

VŠB-Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Optimalizace razícího cyklu tunelu hlavní trasy silničního obchvatu
města Stockholm v úseku pod jezerem Mälaren

Optimization of Tunnel Excavation Cycle Executed in the Main
Tunnel of the Stockholm Bypass in the Section Below Lake Mälaren

Student:

bc. Tomáš Bílý

Vedoucí diplomové práce:

Ing. Lukáš Ďuriš, Ph. D.

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Bílý**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T035 Geotechnika

Téma: **Optimalizace razícího cyklu tunelu hlavní trasy silničního obchvatu
města Stockholmu v úseku pod jezerem Mälaren**
**Optimization of Tunnel Excavation Cycle Executed in the Main Tunnel
of the Stockholm Bypass in the Section Below Lake Mälaren**

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Popis a posouzení stávajícího projektu zajištění výrubu a celého razícího cyklu
3. Nedostatky stávajícího řešení a posouzení nesystémových opatření pro jejich překonání
4. Návrh a posouzení optimalizace razícího cyklu
5. Časový a ekonomický dopad navržených variant
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Klepsatel, F. *Výstavba tunelů ve skalních horninách*. 1. vyd. Bratislava: Jaga group, 2003, 215 s. ISBN 80-889-0543-5.

Wood, M., Marshall, A. *Tunneling: management by design*. London: E & FN Spon, 2000. ISBN 0-419-23200-1.

Kolymbas, D., *Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling*. Berlin: Springer, c2005, xv, 437 s. ISBN 35-402-5196-0.

Singh, B., Goel, R. *Tunnelling in Weak Rocks*. Elsevier 2006. ISBN: 978-0-08-044987-6

Rozsypal, A. *Kontrolní sledování a rizika v geotechnice*. Jaga: Bratislava, 2001. ISBN 80-88905-44-3.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Lukáš Ďuriš, Ph.D.**

Datum zadání: 28.02.2019

Datum odevzdání: 29.11.2019

doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠBTUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst.3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠBTUO
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Anotace

Tato práce se zabývá optimalizací razicího cyklu úseku tunelu Förbifart Stockholm, Mälarpassagen. Úvodem představuje samotný projekt a jeho význam pro oblast Stockholmu. Teoretická část podává přehled o všech operacích, technologiích a materiálech využívaných k ražbě tunelu. Praktická část poté analyzuje nedostatky výchozího řešení a identifikuje oblasti pro možnou optimalizaci. V následující části pak navrhuje vlastní řešení, která posléze posuzuje a specifikuje vliv návrhů na efektivitu ražby. Závěrem navrhuje výsledné kombinace řešení, aplikuje je na ražbu tunelového díla a vyhodnocuje jejich vliv rychlost ražby.

Klíčová slova

Razicí cyklus, Förbifart stockholm, optimalizace ražby.

Abstract

This diploma thesis deals with optimization of excavation process of Mälarpassagen, which is part of tunnel project Förbifart Stockholm. At the beginning describes project itself and its significance. Theoretical part of thesis gives reader an overview of individual works, technologies and materials used during an excavation process. Practical part then analyzes inefficiencies of current solution and identifies areas for potential optimization. In following part it brings authors own designs, which are afterwards analyzed. Also thesis specifies influence of designs on effectivity of excavation. In the end thesis combines individual designs into combinations, applies them on excavation process and evaluates their influence on speed of excavation process.

Keywords

Excavation process, Förbifart Stockholm, optimization of excavation.

Obsah

1	Úvod	7
2	Základní informace o projektu a jeho účel	8
3	Popis původní technologie ražby a zajištění výrubu	11
3.1	Mälarpassagen	11
3.2	Nové projekční řešení Mälarpassagen	13
3.3	Bypass tunely	14
3.4	Technologie ražby hlavních tunelů	16
3.4.1	Dělení čelby	16
3.4.2	Těsnící injektáž	17
3.4.3	Mikropilotový deštník	19
3.4.4	Trhací práce	21
3.4.5	Odtěžba a začištění a mapování	22
3.4.6	Stříkaný beton	23
3.4.7	Kotvy	24
4	Původní projektové řešení	26
4.1	Razící cyklus pro horninovou třídu 4	29
4.2	Razící cyklus pro horninovou třídu V	34
4.3	Vedlejší operace ražby	39
5	Optimalizace razícího cyklu	41
5.1	Optimalizace ražby v horninové třídě IV	41
5.1.1	Vertikální dělení čelby na dva dílčí výlomy	41
5.1.2	Ražba na plný profil	43
5.1.3	Prodloužení záběru na 3,33 metrů	45
5.1.4	Prodloužení záběru na 5 metrů	47
5.1.5	Výsledný návrh	49
5.2	Optimalizace ražby v horninové třídě V	50
5.2.1	Snížení dělení čelby na kombinované dělení na tři dílčí výlomy	50
5.2.2	Snížení dělení čelby na vertikální dělení na dva dílčí výlomy	52
5.2.3	Prodloužení záběru na 2,5 metrů	54
5.2.4	Prodloužení záběru na 3,33 metrů	56
5.2.5	Výsledný návrh	58
5.3	Optimalizace vedlejších operací ražby	59
5.3.1	Injektáž	59
5.3.2	Mikropilotový deštník	60

5.4	Kompletní návrh.....	61
6	Konvergenční měření	62
7	Závěr.....	64
8	Seznam zdrojů	65
9	Seznam obrázků	67
10	Seznam tabulek	68
11	Seznam grafů.....	69

1 Úvod

Skandinávský poloostrov je jeden z nejstarších geologických celků Evropy. První známky osídlení se datují až do roku 12 000 př.n.l. v oblasti Skåne na jihu země. Nyní se Švédsko se svými 10.12 miliony obyvateli řadí na 90. místo na světě v počtu obyvatel. Většina populace je koncentrována v metropolitních oblastech tří největších měst Stockholm, Göteborg a Malmö, kde žije v součtu přes 40% celkové populace. V průběhu posledních let dochází k jejímu dramatickému nárustu, zvláště v okolí právě těchto aglomerací, a to především vlivem migrace. Ve Stockholmu došlo v letech 2017 až 2019 k nárustu z 2,08 milionu obyvatel na 2,36 milionu obyvatel a dle prognózy by se do roku 2024 tento počet měl zvýšit až na 2,58 milionu. V souvislosti s nárustem populace dochází k růstu města především na jeho okrajích, kde vznikají nová rezidenční centra. Tato centra vytváří nové pracovní příležitosti, avšak také způsobují potřebu mnoha lidí za prací projíždět centrem Stockholmu, což vytváří mnohem větší požadavky na kapacitu dopravní infrastruktury, než je město aktuálně schopno zajistit. Cesta ze severu města na jih se tak může prodloužit i na několik hodin. Tato situace podněcuje rozvoj stávající infrastruktury. [12]

Švédsko, jakožto 7. nejvyspělejší země světa, se zabývá také dopadem svého rozvoje na životní prostředí a jeho dlouhodobou udržitelnost. Z tohoto důvodu je mnoho staveb umísťováno do podzemí a tím pomáhají zachovávat místní flóru a faunu, kterou si tato země cení a chrání, ale zároveň dovolují další rozvoj regionu. Horninové prostředí Skandinávského poloostrova je navíc pro podzemní díla vhodné, protože se skládá především z metamorfovaných hornin a hlubinných vyvřelin. Díky těmto příznivým geologickým podmínkám je zde odvětví podzemních staveb vysoce perspektivním odvětvím s dlouhodobou tradicí.[12]

Stěžejním projektem rozšíření dopravní infrastruktury v hlavním městě Stockholm je tunelový obchvat Förbifart Stockholm, který je 2. největší tunelovou stavbou světa. Kvůli svému rozsahu byla tato stavba rozdělena do několika dílčích úseků. Jedním z nich je i úsek Mälarpassagen, o kterém tato práce pojednává.[9]

2 Základní informace o projektu a jeho účel

Projekt Förbifart Stockholm vzniknul jako způsob zlepšení dopravní situace Stockholmu. Aktuálně existují pouze tři cesty spojující severní a jižní část Stockholmu (obrázek 1). První a nejvýznamnější je trasa Essingeleden, která je součástí celostátní dálnice E4, vedoucí od hranice Švédska s Finskem na severu země, až po město Gävle na jihu, nedaleko hranice s Dánskem. Druhá je silnice 73, která vede srdcem Stockholmu a má výrazně nižší kapacitu než E4. Třetí cesta vede přes ostrov Eköre a zahrnuje i přepravu vozidla lodí. [9]

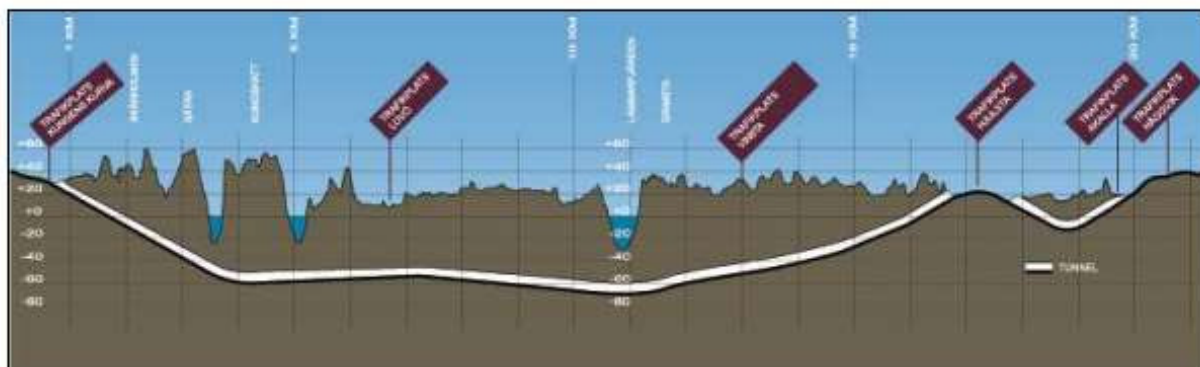


Obrázek 1 - Aktuální možné trasy městem, A- E4 Essingeleden, B- silnice 73, C - Eköre

Dálnice Essingleden byla otevřena roku 1967, kdy Stockholm měl pouze milion obyvatel, a její kapacita byla tehdy projektována na 80 000 vozidel za den. V současnosti však tuto silnici denně využije přes 160 000 tisíc vozidel. První studie na posílení dopravní infrastruktury začaly roku 2001 a v roce 2005 byly navrženy tři varianty trasy, z nichž byla roku 2006 vybrána trasa Förbifart Stockholm. Další projektování a připomínkování pokračovalo až do roku 2014, kdy vláda projekt definitivně schválila. [4]

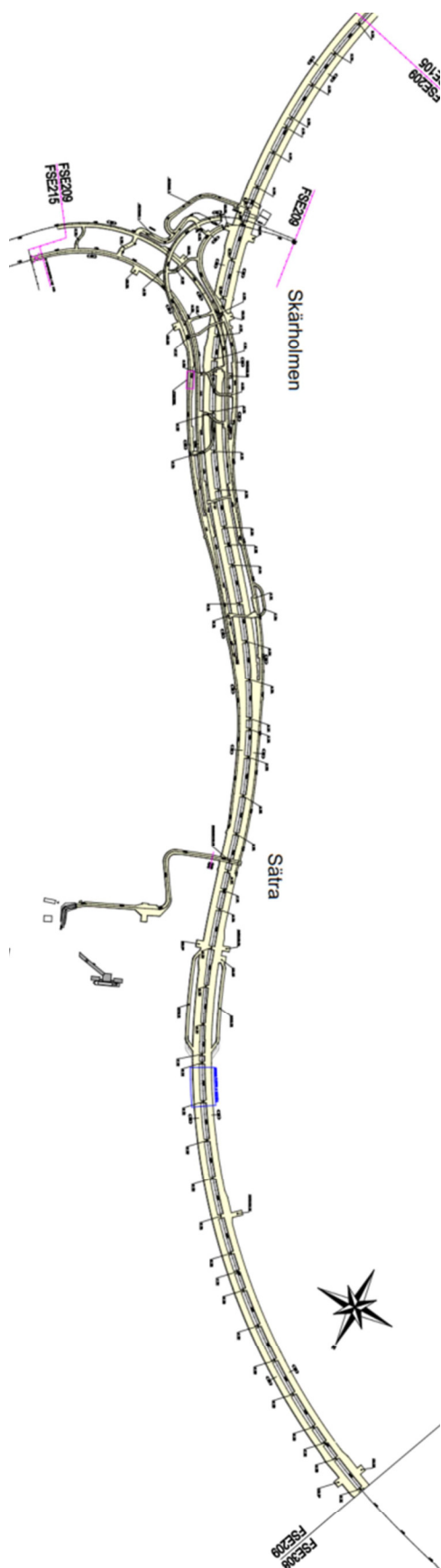
Trasa obchvatu vede z Häggvik (sever) do Kungens kurva (jih) a měří dohromady 21 km, z čehož 18 km je vedeno tunely (obrázek 2). Hlavní trasa je tvořena dvěma tunelovými tubusy a je na šesti různých místech napojena na již existující silniční síť. Celkový objem vytěžené horniny je téměř 6 500 000 m³. Vzhledem k rozsahu stavby je celý projekt rozčleněn na 8 dílčích projektů o objemu 12 000 m³ – 1 544 000 m³ vytěžené horniny. Výsledná

projektovaná kapacita obchvatu je 140 000 vozidel za den a délka průjezdu celé trasy bude asi 15 minut. [5]



Obrázek 2 – Řez trasou Förfart Stockholm

Tato diplomová práce se zabývá úsekem Mälarpassagen, který je částí dílčího projektu FSE209. FSE209 zahrnuje ražby ze dvou lokalit – Sättra a Skärholmen (obrázek 3). Tyto lokality se nachází přibližně 3 km od sebe. V oblasti Skärholmen se kromě hlavních tunelů ještě nachází i jedno z křížení, které bude spojovat stávající silniční síť s nově vyraženým tunelem. Nachází se zde dohromady 4 nájezdové rampy a několik menších tunelů, sloužících k evakuaci nebo jako pracovní tunely. Druhá lokalita, Sättra, se nachází v chráněné oblasti Sättraskogens naturreservat. Zde je vybudován přístupový pracovní tunel, ze kterého dále probíhá ražba hlavních tubusů. Vzhledem ke svému umístění nebylo možné z tohoto místa odvázet rubaninu nákladními auty. Avšak díky tomu, že se pracoviště nachází v přístavu, bylo možné postavit pásový dopravník, který rubaninu nakládal na lodě. Těmi byla dále přepravována k dalšímu zpracování. Od doby, kdy se propojily hlavní tubusy mezi pracovišti Skärholmen a Sättra, je rubanina i odsud odvážena nákladními auty skrz hlavní tunel a ven přes staveniště Skärholmen. Pod staveniště Sättra také spadá problematický úsek Mälarpassagen.[7]



Obrázek 3 - Mapa projektu FSE209

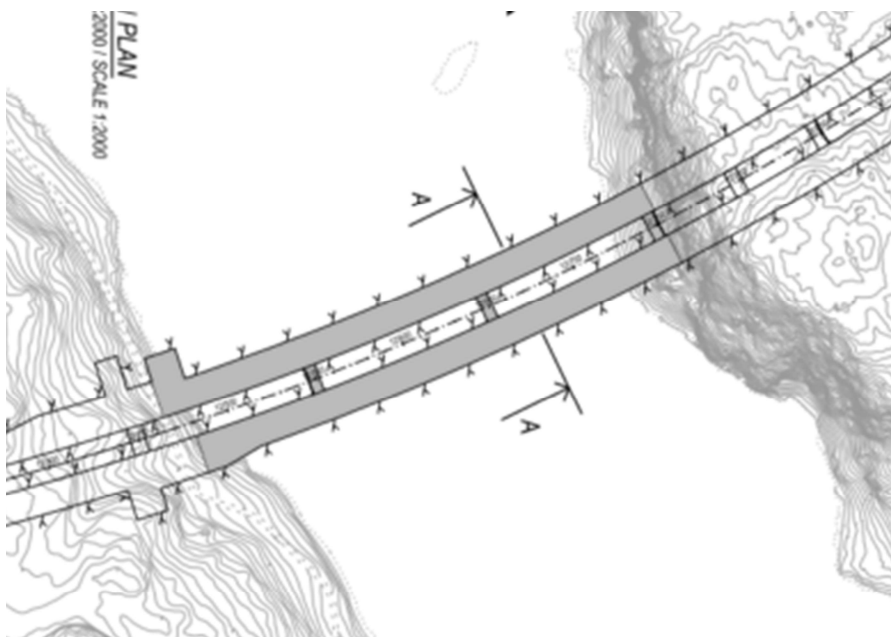
3 Popis původní technologie ražby a zajištění výrubu

3.1 Mälarpassagen

Mälarpassagen je část trasy hlavních tunelů, která se nachází přímo pod jezerem Mälaren a měří 240 metrů (obrázek 4). Původní zadávací dokumentace specifikovala ražbu v předpokládaných horninových třídách IV a V. [7]

Ražba v horninové třídě IV měla probíhat pod ochranou jehel (tzv. Förbult) délky 6 metrů, o průřezu 32 milimetrů, v osové vzdálenosti 0,5 metrů a vrtané pod úhlem 20° do předpole po každém záběru. Maximální délka záběru byla tedy omezena na 3 metry, neboť bylo třeba zajistit 3 metrové překrytí jehel. Dalším omezením bylo rozdělení záběru na pilotní tunel a dobírku. Maximální šířka pilotního tunelu byla 8 metrů. Zajištění výrubu pak bylo prováděno aplikací 50 milimetrů stříkaného drátkobetonu a 6 metrů dlouhými systémovými radiálními kotvami v rastru 1,7 x 1,7 metrů. [7][6]

Horninová třída V měla oproti třídě IV vzdálenost mezi jehlami sniženou na 0,3 metrů, s překrytím 3,5 metrů, což omezovalo záběr na 2,5 metrů. Maximální šířka pilotního tunelu byla snižena na 6 metrů. Vrstva stříkaného betonu byla zvýšena na 100 milimetrů a rastr kotev změněn na 1,5 x 1,5 metrů. Součástí ražebného cyklu v V. horninové třídě měla být také instalace konvergenčních profilů a následný monitoring.[7][6]



Obrázek 4 – Řešený úsek Mälarpassagen dle prvního návrhu

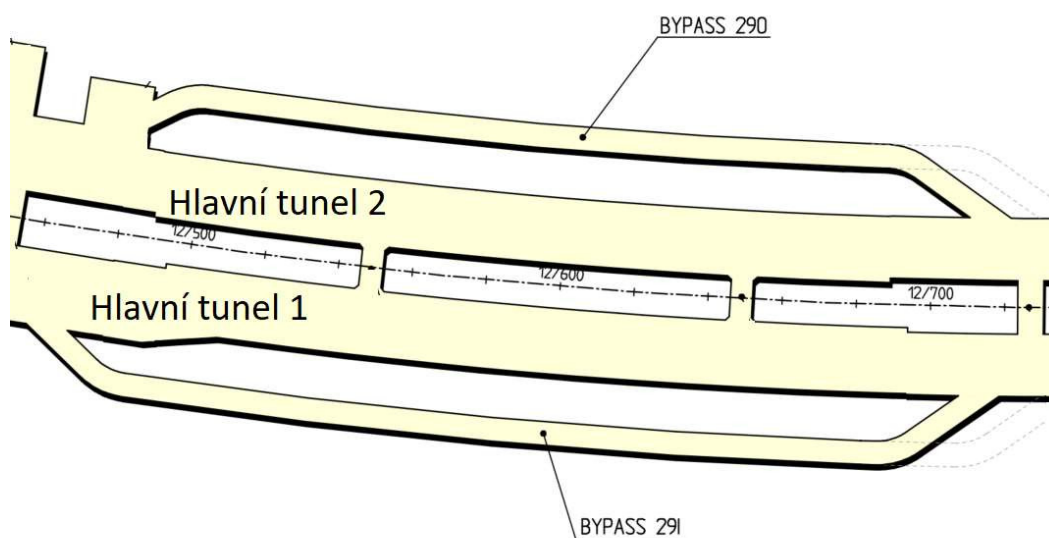
Další podmínkou ražby bylo provedení jádrových vrtů v ose hlavních tunelů pro ověření předpokládané geologie. V prosinci 2017 ražba postoupila až k hranici úseku pod jezerem Mälaren a byly provedeny jádrové vrty — v tunelu HT201 vrt o délce 201 metrů a v HT202 o délce 88 metrů. Jádra vrtů ukázala, že prostředí pod jezerem je tvořené středně až silně rozpukanou rulou, pravidelně prokládanou mokrou vrstvou grafitu malé mocnosti a několik významějších zón diskontinuit tvořené velmi vlhkým, silně rozpukaným grafitem a kataklazitem mocnosti 15-30 metrů. Zastižené podmínky (obrázek 5) se značně lišily od těch, které návrh projektu předpokládal, a proto byla ražba v tomto úseku pozastavena na několik měsíců a úsek přeprojektován. [7][6]



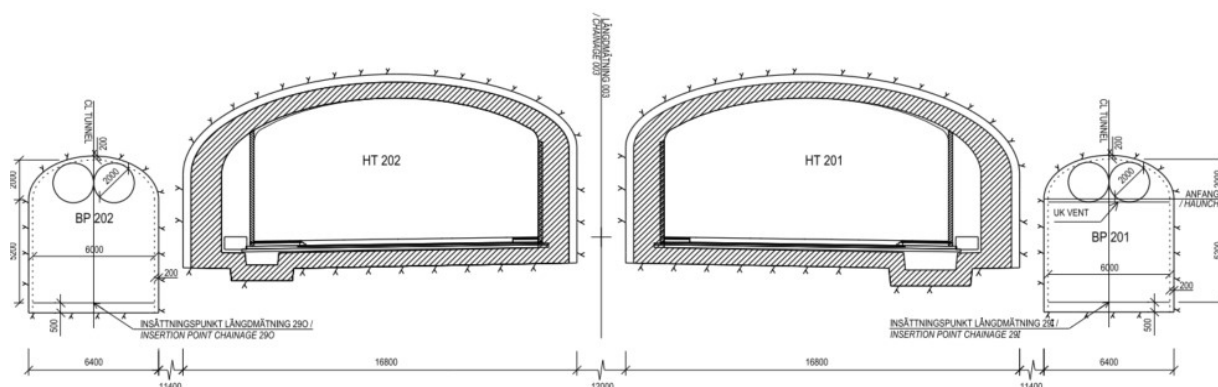
Obrázek 5 - Fotografie čelby v průběhu ražby v hlavním tunelu 1

3.2 Nové projekční řešení Mälarpassagen

Ražba podle nového řešení (obrázek 6 a 7) začala v dubnu 2018. Ta byla odstartována ražbou dvou tunelů menších rozměrů, nazývané Bypass I a Bypass II, vedené vedle hlavních tunelů. Tyto tunely sloužily především jako průzkumná díla pro hlavní tunely. Druhou funkcí těchto tunelů bylo umožnit ražbu za jezerem, buď ve směru od jezera pod ostrovem Kungshatt, kde bylo ještě dalších 2,7 kilometrů tunelů k vyražení, a nebo zefektivnit ražbu úseku pod jezerem díky možnosti ražby z druhé strany úseku.[7]



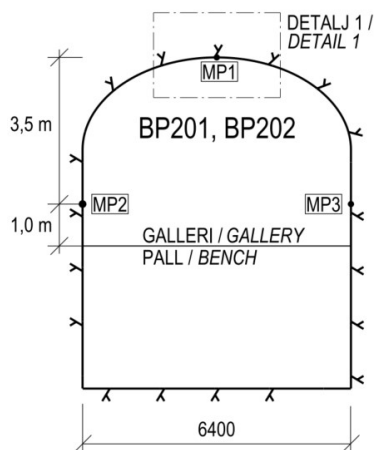
Obrázek 6 - Půdorysné schéma nového řešení



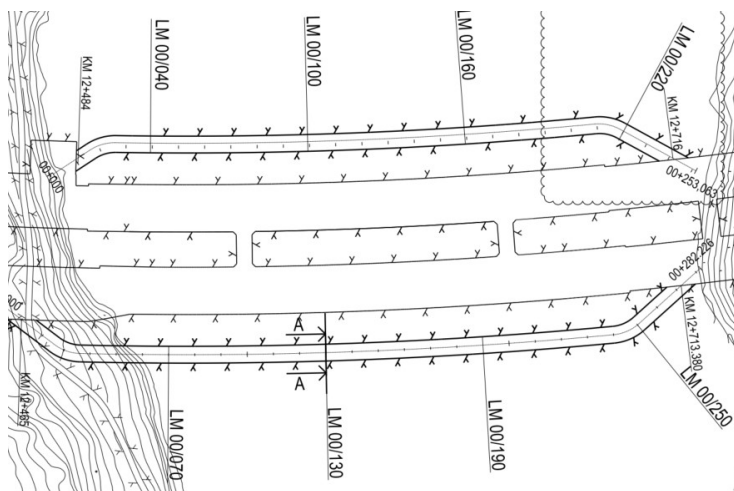
Obrázek 7 - Prostorové uspořádání nového řešení v řezu

3.3 Bypass tunely

Bypass tunely jsou od hlavních tunelů odděleny horninovým pilířem tloušťky 11,4 metrů a jejich dno je vedeno 2 metry pod dnem hlavních tunelů. V délce celého bypass tunelu je každých 60 metrů (obrázek 9) instalována trojice konvergenčních hranolů (obrázek 8). Ty slouží k pravidelnému měření konvergencí stropu a stěn tunelu. [7]

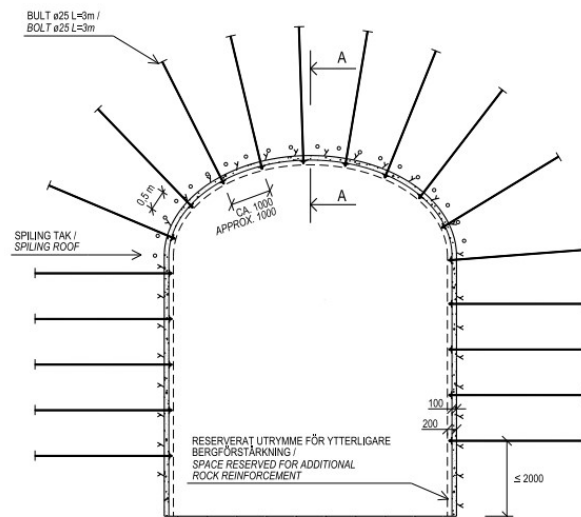


Obrázek 8 - U umístění měřičských bodů v konvergenčním profilu



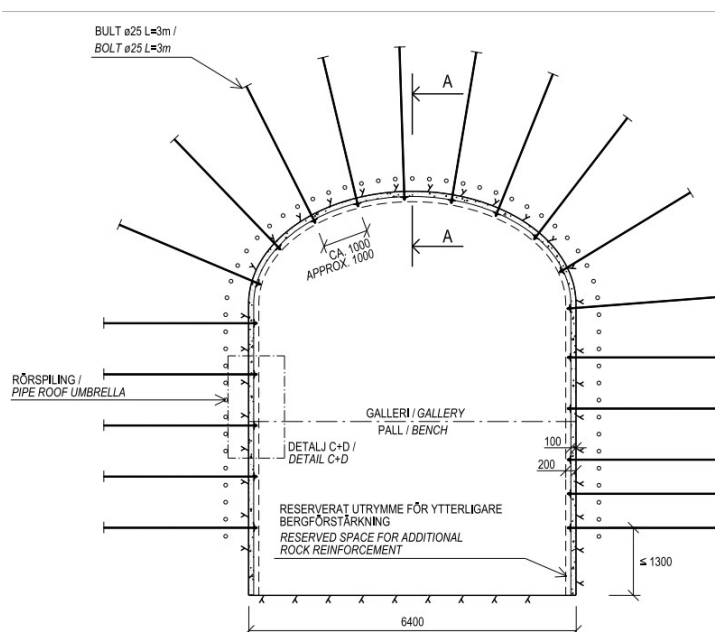
Obrázek 9 - Umístění konvergenčních profilů v trase bypass tunelů

Ražba v třídách I-IV probíhala pod ochranou 8 metrů dlouhých jehel průměru 32 milimetrů v osové vzdálenosti 0,5 metrů s překrytím 5 metrů. Dílo bylo raženo plným profilem se záběrem 3 metry. Po každém záběru musel být výrub kompletně zajištěn 100 milimetry stříkaného betonu a 3 metry dlouhými kotvami, v rastru 1 x 2 metrů (obrázek 10).[7]



Obrázek 10 - Schéma vyztužení výrubu bypass tunelů v horninových třídách I-IV

Ražba v horninové třídě V byla zabezpečena mikropilotovým deštníkem Ishebeck TITAN 73/45 délky 15 metrů. Což je technologie využívaná ve skandinávských zemích jen sporadicky. Profil díla byl v této třídě rozdělen na kalotu a dno. Na čelbě kaloty bylo využito také dočasného vyztužení ve formě čelbových sklolaminátových kotev délky 15 metrů. Trvalá výztuž díla byla tvořena dvěma 50 milimetrů tlustými vrstevmi stříkaného betonu, mezi které byla instalovaná jedna vrstva armovací sítě NK500AB 8150, a systémovými kotvami délky 3 metry (obrázek 11). [7]



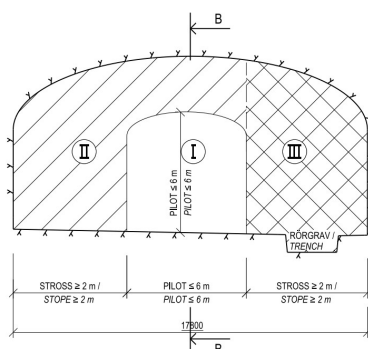
Obrázek 11 - Schéma vyztužení výrubu bypass tunelů v horninové třídě V

3.4 Technologie ražby hlavních tunelů

Hlavní tunely v úseku Mälarpassagen mají šířku 16 metrů, výšku 8,7 metrů a jsou od sebe odděleny horninovým pilířem tloušťky 12 metrů. Celý cyklus ražby se opakuje každých 10 metrů. Začíná těsnicí injektáží, po které následuje vrtání mikropilotového deštníku a jeho injektování, poté vrtání pro trhací práce, nabíjení, odkliz horniny, strojové a následně ruční začištění výrubu a instalace dočasné (pokud ji projekt předepisuje) a trvalé výztuže. Po instalaci veškeré výztuže se proces ražby opakuje od trhacích prací, dokud není vyraženo 10 metrů tunelu, kdy celý cyklus začne od začátku. Jednotlivé operace se liší podle horninové třídy, tyto rozdíly budou popsány dále. [7]

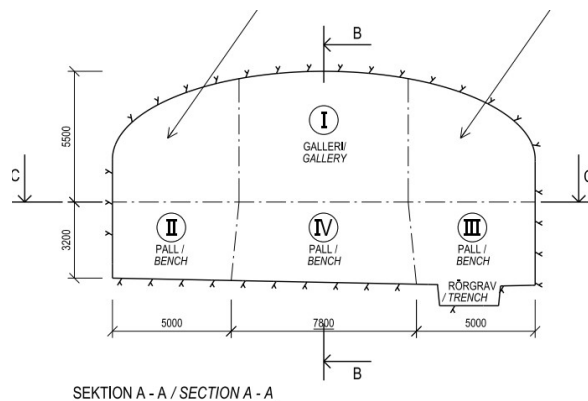
3.4.1 Dělení čelby

Ražba v horninové třídě I-IV se dělí na 3 části (obrázek 12). Délka záběru je 2,5 metrů. Nejprve je vyražen pilotní tunel v celé své délce 10 metrů. Tento tunel může být široký a vysoký maximálně 6 metrů. Poté následuje sřídání přistřílky levé části tunelu se stropem a pravé části. [7]



Obrázek 12 - Schéma dělení čelby hlavního tunelu pro horninovou třídu I-IV

Čelba v horninové třídě V se dělí na 5-6 částí s délkou záběru 2 metry (obrázek 13). Před začátkem samotného cyklu musí být zbudována rampa umožňující přístup techniky ke kalotě díla. Cyklus začíná vyražením kaloty tunelu v celé své délce. Kalota se navíc dělí na tři sekce, pilotní tunel a dvě přistřílky. Zde záleží na rozhodnutí klienta, zda-li chce provádět ražbu celé kaloty najednou nebo ji rozdělit do 2-3 kroků. Po doražení kaloty je rampa odstraněna a střídavě je ražena levá, pravá a nakonec středová část dna. Pravá a levá část jsou 5 metrů široké a 3,2 metrů vysoké. Středová část je vysoká také 3,2 metrů, ale široká 7,8 metrů. V posledních dvou zabírkách cyklu je vynechána ražba středové části, aby sloužila jako opěrný pilíř o šířce minimálně 4 metry, dle schématu na obrázku níže. [7] [2]



Obrázek 13 - Schéma dělení čelby hlavního tunelu v horninové třídě V

3.4.2 Těsnící injektáž

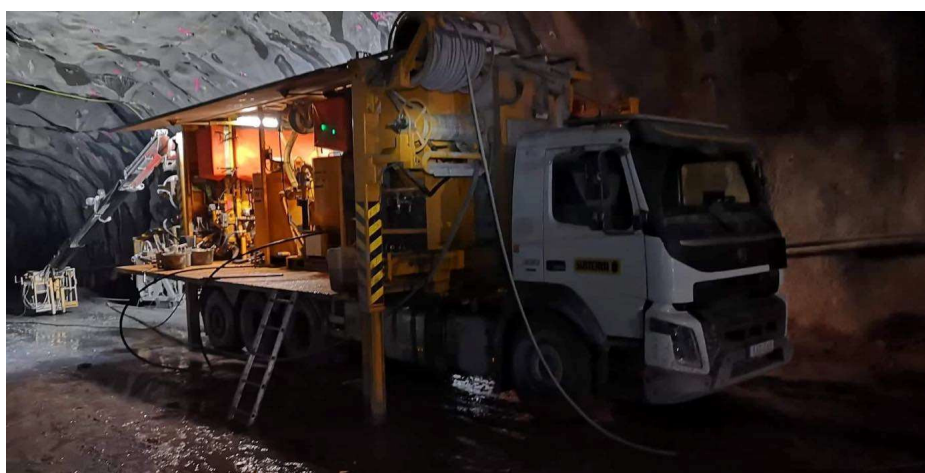
Účelem těsnící injektáže je utěsnit prostředí v předpoli tunelu pomocí injektážní směsi. Pro vrtání veškerých vrtacích prací, vyjma vrtání mikropilotového deštníku, se používá vrtačka Atlas-Copco vybavená třemi lafetami. Jako první je navrtáno 8 vrtů o délce 1-1,5 metrů a průměru 105 milimetrů, do kterého je zaveden bezpečnostní uzávěr (obrázek 14). Jedná se o mechanismus, který při případném vysokém přítoku vody dovolí vrt uzavřít a zamezit tím přítoku vody. Skládá se z výpažnice, která je zavedena do samotného vrtu a následně zainjektována, a hlavy, která v případě potřeby vrt uzavře. [3][7]



Obrázek 14 - Nainstalovaná výpažnice bezpečnostního uzávěru

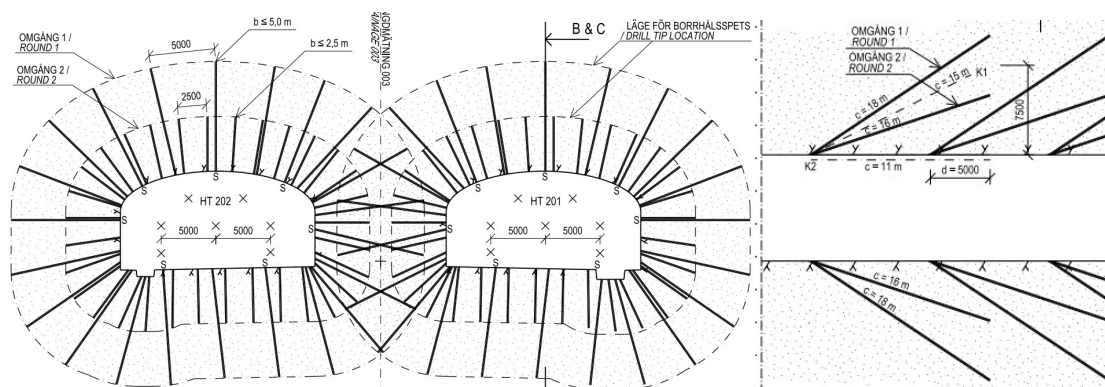
Nejprve je navrtán okruh 32-34 těsnících vrtů délky 18 metrů. Jako první jsou vyvrtány injektážní vrty, které jsou osazeny bezpečnostními uzávěry, aby případný extrémní přítok vody bylo možné zvládnout. V případě, že přítok vody nevyžaduje využití bezpečnostního ventilu jsou vyvrtány zbývající vrty. Ty jsou následně zainjektovány směsí injektážního cementu, vody

a 2% akcelérátoru tuhnutí. Směs je pomocí injektážní jednotky AMW (Asia Motor Works) (obrázek 15) čerpána do injektážního vrtu. Tato jednotka je vybavená vlastní jednotkou na míchání směsi a čtyřmi čerpadly, které dovolují injektovat až čtyři vrtu zároveň. Každé čerpadlo je také vybaveno měřidlem průtoku a čidlem pro měření a regulaci tlaku injektážní směsi. Po dosažení tlaku injektážní směsi 2,5 MPa je tato úroveň udržována po dobu 20 minut a následně je injektáž daného vrtu ukončena. Je-li množství načerpané směsi do vrtu vyšší než 50 l/metr vrtu, což v případě osmnáctimetrových vrtů je 900 litrů směsi, je injektáž ukončena nezávisle na dosaženém tlaku. [7][8][5]



Obrázek 15 - Injektážní jednotka AMW

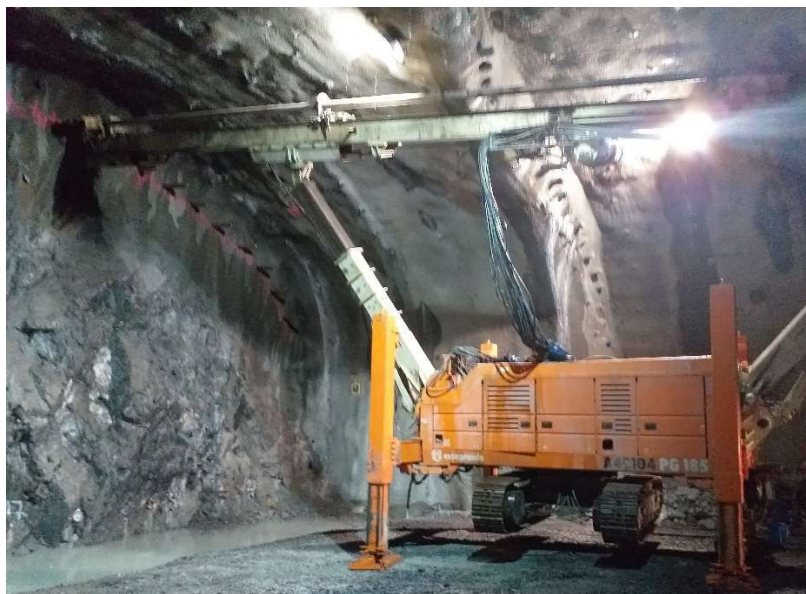
Po injektáži prvního kola vrtů je provedeno druhé kolo. V tomto kole mají injektážní vrtu nižší sklon a délku poze 16 metrů. V druhém kole se již bezpečnostní uzávěry neinstalují. Mezi jednotlivými injektážními vějíři musí být alespoň 6 metrů překrytí. Injektáž se tedy provádí každých 10 metrů. [7][8][5]



Obrázek 16 - Schéma injektážních vrtů prováděné těsnící injektáže

3.4.3 Mikropilotový deštník

Po dokončení injektáže probíhá instalace mikropilotového deštníku. Každá mikropilota je dlouhá 15 metrů a mezi jednotlivými deštníky musí být minimálně 5 metrů překrytí. Vrtání probíhá pomocí vrtací soupravy Cassagrande PG185 (obrázek 18). Na lafetu vrtačky je upnuta výpažnice, která poté bude tvořit samotnou mikropilotu. Tato výpažnice musí být upnuta v celé své délce, protože vrtačka nedovoluje připojení nových segmentů v průběhu vrtání. Výpažnice má průměr 139,7 milimetrů, tloušťku stěny 10 milimetrů a je navíc na svém konci opatřena vrtným profilem (obrázek 19). Výpažnicí je vedeno vrtné soutyčí s vrtnou korunkou, opět v celé své délce. Vrtná tyč přivádí na dno vrtu vodu, která slouží ke chlazení celé soustavy a vyplavuje vrtnou drť ven z vrtu. Po dovrtnání je vrtaná tyč s korunkou z vrtu vytažena, výpažnice je však ve vrtu ponechána, protože bude tvořit samotnou mikropilotu.[7] [1]



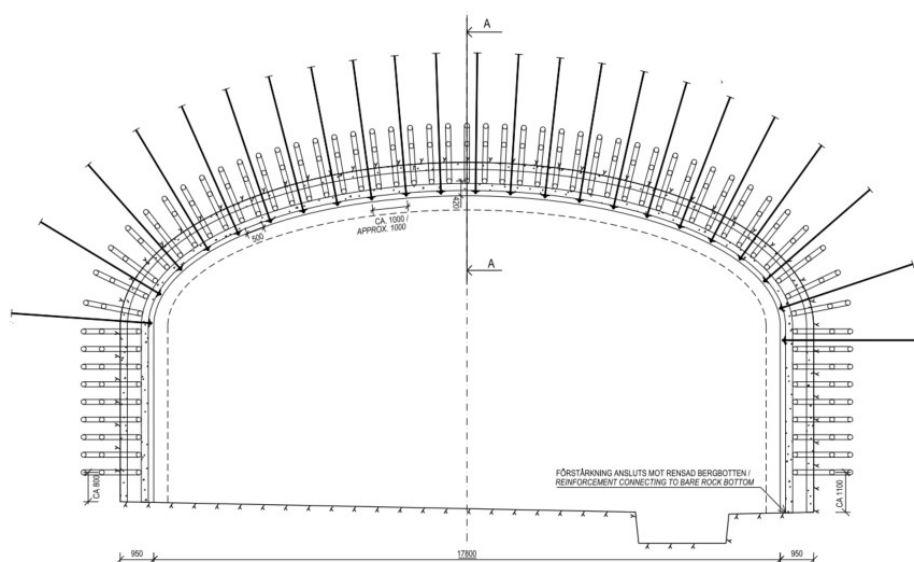
Obrázek 17 - Vrtačka Cassagrande



Obrázek 18 - Vrný profil výpažnice

Následně je celá mikropilota zainjektována injektážní směsí. Po zatuhnutí směsi je v každém druhém prostoru mezi pilotami ve stropě a rozích díla vyvrtána dvojice radiálních vrtů průměru 52 milimetrů ve vzdálenosti 400 milimetrů. Do těchto vrtů jsou nainstalovány PC kotvy, které jsou následně zainjektovány. [7]

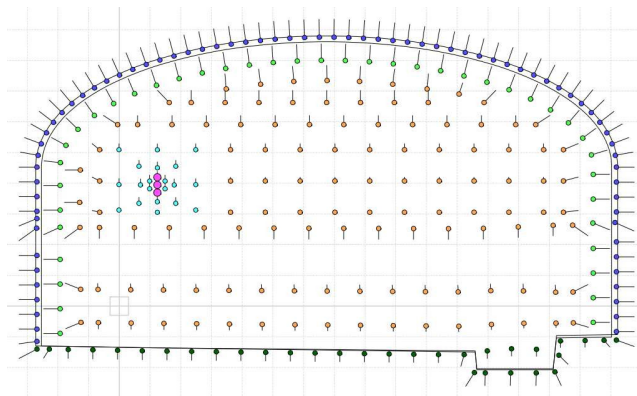
Mikropilotový deštník tvoří 65 mikropilot ve vzdálenosti 0,5 metrů (obrázek 20). Tento deštník je instalován do stropu rohů a stěn díla. První dva deštníky navíc vystrojeny trojicí extenzometrů a trojicí inklinometrů, které jsou instalovány do samotného těla mikropiloty. [7]



Obrázek 19 - Schéma mikropilotového deštníku v průřezu stavby

3.4.4 Trhací práce

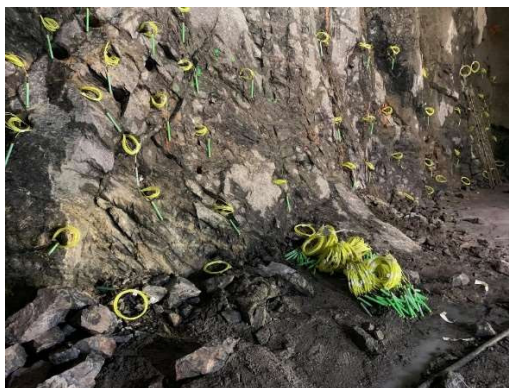
Vrtání pro trhací práce je prováděno třílafetovou vrtačkou WE3C30 společnosti Atlas-Copco. Vrtý mají průměr 48 milimetrů a délku dle záběru buď 2 metry pro horninovou třídu V nebo 2,5 metrů pro horninovou třídu IV. Počet vrtů se pohybuje mezi 50-110 vrtů, v závislosti na dělení čelby. Celkový počet vrtů na jeden záběr plného profilu se pohybuje okolo 280 vrtů (obrázek 20). Používá se tříštivý zálohm. [7]



Obrázek 20 - Příklad vrtného schéma pro trhací práce

Samotné trhací práce jsou prováděny pomocí emulzní trhaviny Forcít Minex Eco 29x550. Rozbušky se používají elektrické - Forcít Forprime 25, které dovolují trhací práce rozdělit až na 25 časových stupňů (obrázek 22). Přesné rozdělení vrtů dle časových stupňů si stanovuje sám střelní mistr na směně. [7]

Oblast, kde dojde k odpalu je dopředu ohrazena červenou páskou. Na odpal je navíc upozorněno pomocí interních vysílaček 15 a 5 minut předem. Po odpalu následuje 1 hodina na odvětrání zplodin. Veškeré trhací práce navíc musí být předem zaznamenány do internetového systému NCVIB. [7]



Obrázek 21 - Příklad zapojování rozbušek

3.4.5 Odtěžba a začištění a mapování

Po trhacích pracech a odvětrání je na řadě odtěžení. Odtěžba probíhá pomocí kolového nakladače CAT 988 společnosti Caterpillar (obrázek 23). Od čelby je rubanina převezena na mezideponii v prostorách tunelu pomocí dumperu Volvo A30G. Z této mezideponie je v průběhu nočních směn tato rubanina odvážena nákladními auty pryč ze stavby k dalšímu zpracování. V případě, že se jedná o poslední záběr před instalací mikropilotového deštníku, a následující cyklus bude ražen v horninové třídě V, je vhodná část rubaniny pouze odhrnuta ke stranám tunelu a je později využita pro vytvoření rampy, která umožní technice bezproblémovou ražbu kaloty.[7]

Po odklizení rubaniny je čelba a výrub zarovnán pomocí stroje Servicehullastare firmy Hedins vybaveného impaktorem. Zarovnávání je nakonec ručně dokončeno.

Po zarovnání profilu je na místo zavolán geodet, který nové umístění čelby zaměří, zakreslí stav čelby a horninu zatřídí do horninové třídy. Na základě tohoto mapování může být také doporučeno přídatné vyztužení nebo upraven další postup ražby. [7]



Obrázek 22 - Nakladač CAT 988

3.4.6 Stříkaný beton

Aplikace stříkaného betonu se provádí pomocí stříkací soupravy Meyco Potenza (obrázek 24) . Stavba využívá dvou typů stříkaného betonu. Prvním typem je prostý stříkaný beton třídy C35/45 konstrukční třídy S4 a s třídou ochrany FX4 – Ochrana proti střídavému působení mrazu a rozmrzávání v kombinaci s rozmrazovacími prostředky nebo mořskou solí. Druhým typem je stříkaný beton stejné třídy se stejnou třídou ochrany, který ale obsahuje také rozptýlenou výztuž ve formě drátků délky 55 milimetrů z uhlíkové oceli FL35. [7]

Drátkobeton je používán pro první vrstvu trvalé výztuže ostění tunelu a jako dočasná výztuž čelby díla. V případě že se nepoužívá výztužných sítí, mohou být i další vrstvy tvořeny drátkobetonem. Beton je aplikován ve vrstvách po 50 milimetrech jak na ostění, tak na čelbu tunelu. Použití tohoto betonu je doprovázeno pravidelnými zkouškami pevnosti a obsahu drátků v betonu. Prostý beton je využíván jako druhá a další vrstva betonu v případě, že se využívá výztužných sítí, a jako krycí vrstva hlav kotev, aby se zamezilo jejich korozi. [7]



Obrázek 23 - Stříkací souprava Meyco Potenza

3.4.7 Kotvy

Druhým výztužním prvkem jsou kotvy společnosti PreCast Technology. Celkem se používá třech typů kotev: SN, PC a Titan. Rozdíly mezi jednotlivými kotvami jsou v účelu jejich použití, způsobem uchycení kořenu kotvy a způsobem jejich instalace.[7]

Nejčastěji užívaným typem kotvy jsou SN kotvy (obrázek 25) s třemi povrchovými vrstvami sloužící k zamezení koroze prvku. Samotné tělo kotvy je tvořeno ocelí B500. První vrstva je vytvořena galvanizací kotvy zinkem v lázni o teplotě 450-560°C. Druhá vrstva je tvořena zinko-manganovým fosfátováním, na kterou je ihned nanесena třetí vrstva protikorozního prášku na epoxidové nebo polyesterové bázi. Po aplikaci protikorozního prášku je ke kotvě za teploty 210°C připečen. Takto povrchově upravená kotva velmi dobře odolává korozi, především vlivem rozpouštědel a vody s vysokou salinitou. Povrch kotvy je u konce opatřen závitem, na který je našroubována matice, která tvoří kořen kotvy. Tyto kotvy se používají jako trvalá radiální výztuž díla.[13] [7]

Po vyvrtání vrtů o průměru 48 milimetrů, jsou postupně jednotlivé vrty zainjektovány pomocí injektážní jednotky Putzmeister. Do každého vrtu je ihned po zainjektování zavedena kotva s maticí na konci. Na vyčnívající konec kotvy je nainstalován krycí talíř, vyrovnávací podložka a matice. Prostor pod podložkou je ještě dodatečně zainjektován. Po zakotvení úseku o délce minimálně 10 metrů, jsou hlavy kotev zastříhány krycí vrstvou prostého stříkaného betonu. [7]

Výhodou SN kotvy je především její cena. Nevýhodou je injektáž před zavedením kotvy, což vede k hustší konzistenci injektážní směsi. Hutnější konzistence pak zapříčiňuje horší vyplnění vrtu a nedokonalý spoj směsi a kotvy. Při vtlačení kotvy do zainjektovaného vrtu, kotva také vytlačuje část injektážní směsi čímž zapříčiňuje zvýšení produkovaného odpadu. Poslední nevýhodou je nemožnost použití distančních prvků a tudíž nemožnost zajištění centralizace kotvy ve vrtu.

Druhým používaným typem kotev jsou PC kotvy (obrázek 25). Povrchová úprava těchto kotev je stejná jako u SN kotev, liší se však způsobem její instalace, kořenem kotvy a způsobem jejího zainjektování. Tělo kotvy je navíc duté, narozdíl od SN kotvy, a je opatřeno distančními prvky, aby bylo zajištěno umístění kotvy ve středu rtu. Vrty pro PC kotvy mají průměr 52 milimetrů. Větší průměr, oproti kotvám SN, umožňuje kořenu kotvy bezproblémový průchod vrtem. Kořen kotvy je tvořen hlavou s rozevíratelnými zarážkami, které zajišťují kotvu před

vypadnutím z vrtu bez potřeby injektáže vrtu předem. Při instalaci je kotva nejprve zavedena do vrtu a po prudkém zatažení za konec kotvy se zářezky na kořenu vrtu rozevřou. Poté je na konec kotvy vyčnívající z vrtu nainstalována matice, vyrovnávací podložka a talíř s otvorem pro injektáž. Následně je kotva zainjektována připojením injektážního nástavce na konec kotvy a zavedením tzv. packeru do otvoru na talíři. Skrz tento nástavec a samotné tělo kotvy je vrt zainjektován. Injektáž kotvy je dokončena doinjektováním prostoru pod hlavou kotvy pomocí packeru. Po dokončení injektáže je plnicí hadice packeru přeložena a svázána tak, aby přes ni nedocházelo k úniku injektážní směsi. [7][14]

Výhodami PC kotev je především instalace kotvy před injektáží. To umožňuje využití směsi vhodnější konzistence, díky které dojde k lepšímu a rovnoměrnějšímu vyplnění vrtu injektážní směsí. Dalšími výhodami je také menší spotřeba injektážní směsi a fyzicky méně náročná instalace. Nevýhodou je vyšší cena oproti SN kotvám.[7][14]



Obrázek 24 - Kořeny kotev SN (vlevo) a PC (vpravo)

Posledním používaným typem jsou kotvy Pre-Cast Technology Titan. Jedná se o samozávrtné kotvy dlouhé 15 metrů tvořené segmenty, které mají délku 3 metry. Tyto kotvy se používají jako dočasná výztuž čelby. Instalace probíhá pomocí běžné vrtačky, na jejíž lafetu je však na místo vrtné tyče osazeno 5 segmentů kotvy, které jsou v průběhu vrtání spojovány. Kotva je osazena vlastní ztracenou vrtnou hlavou která zároveň tvoří kořen kotvy. Po dovrtnání jsou navrtnané kotvy hned zainjektovány. Čelbové kotvy jsou instalovány každých 10 metrů, vzniká tudíž pětimetrové překrytí. Samozávrtné kotvy jsou využívány, jelikož v silně rozpukavém prostředí by mohlo dojít ke kolapsu vrtu a znemožnit tak instalaci kotev po vyvrtání.[7][15]

4 Původní projektové řešení

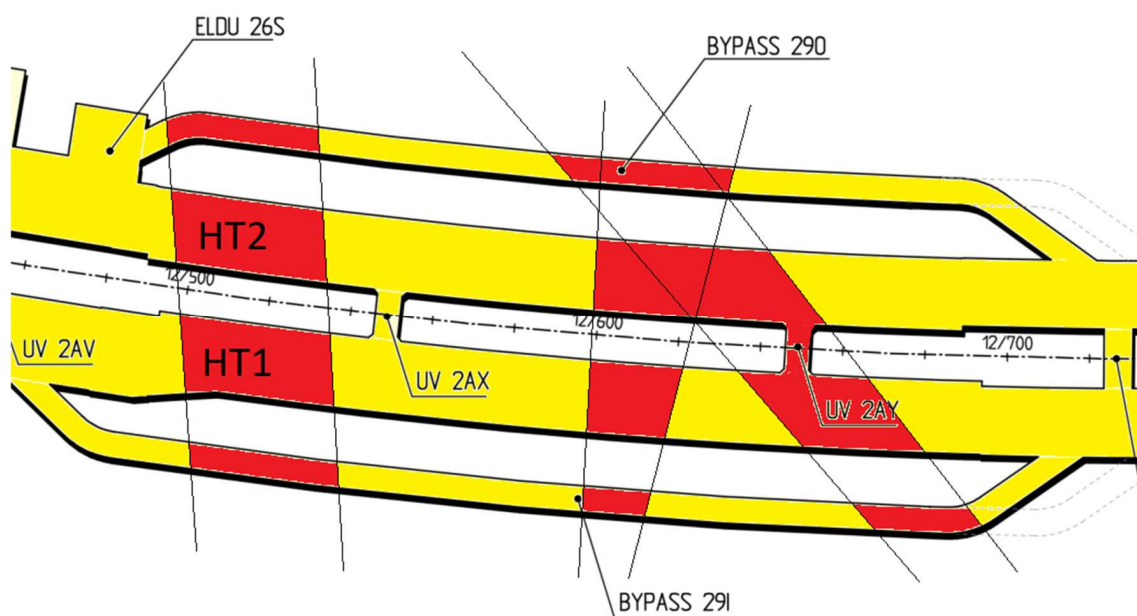
Pro identifikaci oblastí, které mají největší dopad na rychlost ražby, byl vytvořen časový harmonogram průběhu ražby. Rychlosti provádění jednotlivých operací (tabulka 1) byly stanoveny následujícím způsobem. Prvním krokem bylo extrahování důležitých dat ze stavebního deníku za poslední rok. Veškeré práce prováděné v hlavních tunelech byly zapsány do tabulky a roztříděny dle činnosti. Ke každé činnosti bylo navíc zaznamenáno jeho trvání a počet pracovníků provádějících daný úkon. Posléze byl ke každé činnosti dohledán protokol o vykonané práci, který obsahoval potřebné kvantitativní údaje jako například: množství injektované směsi, množství nastříkaného betonu, počet instalovaných kotev nebo plocha instalovaných armovacích sítí. Pro získání dat o množství použité trhaviny bylo využito již zmíněné databáze NCVIB. Na základě těchto dat byly poté stanoveny tyto parametry rychlostí. Tyto hodnoty poté byly konzultovány s odpovědnými zaměstnanci na staveništi a byla ověřena jejich správnost.

Proces	Hodnota	Jednotka
Injektáž	0.28	min/kg
Injektáž MP deštníku	0.0055	h/m
Deštník radiální kotvy	0.25	h/ks
Vrtání na		
Injektáž	1.75	m/min
Odpal	6.3	m/min
Systémové kotvy	2.1	m/min
MP deštník	0.1	m/min
Čelbové kotvy	1.8125	m/min
Nabíjení	0.0022	h/kg
Odtěžba	0.00467	h/m ³
Zrovnání výrubu	0.0129	h/m ²
Stříkaný beton		
Deštník	0.25	h/m ³
Ostění	0.25	h/m ³
Systémové kotvení	0.138	h/ks
Čelbové kotvy	0.19	h/ks
Sítě	0.12	hod/m ²

Tabulka 1 – Stanovení rychlosti operací ražby

Dále byla na základě geologického mapování, prováděného v průběhu ražby bypass tunelů, vytvořena následující prognóza distribuce horninových tříd v trase hlavních tunelů (obrázek 26). V celé délce Mälarpassagen se vyskytují pouze horninové třídy IV a V. Horninová třída IV odpovídá hodnotě indexu RMR (rock mass rating) v rozmezí 40-70 a

horninová třída V pak odpovídá rozmezí 29-40. Ražba hlavního tunelu 1 vede 110 metry horninové třídy IV a 130 metry horninové třídy V. Ražba hlavního tunelu 2 prochází 130 metry horninové třídy IV a 110 metry horninové třídy V. Celkem tedy bude vyraženo 240 metrů v hlavním tunelu 1 a 240 metrů v hlavním tunelu 2.



Obrázek 25 - Rozložení horninových tříd v trase tunelu, Žlutá - horninová třída IV, Červená - horninová třída V

Injektáž		Geometrie	
Počet kol	192.00	Záběry celkem [ks]	216.00
Počet děr	6,144.00	Plocha průřezu [m2]	134.00
Celková délka vrtů [m]	104,448.00	Objem [m3]	66,247.20
Množství cementu [kg]	235,008.00	Trhací práce	
MP deštník		Počet vrtů	53,760.00
Počet	6,240.00	Délka vrtů celkem [m]	134,400.00
Celková délka vrtů [m]	93,600.00	Odtěžba	
Radiální kotvy	3,072.00	Objem vytěžené horniny [m3]	18,549,216.00
Celková délka kotevních vrtů [m]	15,360.00	Zarovnávaná plocha celkem [m2]	56,123.04
Dočasné vyztužení		Trvalé vyztužení	
Stříkaný beton		Stříkaný beton	
Plocha [m2]	13,586.40	Objem [m3]	3,038.40
Objem [m3]	679.32	Sítě	
Kotvy		Plocha [m2]	30,384.00
Počet	1,344.00	Kotvy	
Celková délka vrtů [m]	20,160.00	Počet	20,352.00
		Navrtná délka [m]	101,760.00

Tabulka 2 - Množství použitého materiálu a objem prací pro výstavbu celého úseku Mälarpassagen

Operace ražby jsou rozděleny na hlavní a vedlejší. Hlavní operace zahrnují vrtání, trhací práce, odtěžbu a vyztužení a práce spojené s těmito operacemi. Vedlejší operace pak zahrnuje operace vrtání a instalaci mikropilového deštníku, injektáž, případné dočasné vyztužení čelby kotvami, stavbu a odstranění rampy a protahování luten a vedení elektřiny a vody.

K vybraným trváním jednotlivých operací musel být také připočten fixní čas z následujících důvodů: Operace vrtání přičítá k trvání půl hodiny pro ustavení a zaměření vrtací soupravy a půl hodiny na její mobilizaci. Operace injektování připočítává půl hodiny pro rozložení injektážní stanice a půl hodiny na její složení. Operace stříkaného betonu připočítává 2,5 hodiny ke každému případu stříkání. Tato doba je stanovena bezpečnostním plánem jako doba, během které je zakázáno vstupovat pod vrstvu čerstvého betonu, tudíž zde ani nemohou probíhat žádné navazující práce. K této operaci je také připočteno půl hodiny pro přípravu stříkacího vozu a autodomíchávače. [3]

Pro tvorbu modelu bylo také potřeba zohlednit několik časových omezení, určujících, kdy jsou určité zdroje dostupné. Pracovní směny stavby se dělí na denní 7:00 až 19:00 a noční 19:00 až 7:00., avšak v hodinách 7:00-8:00 a 19:00-20:00 dochází k výměně směn, rozdělování práce a jiným organizačním záležitostem, tudíž v tuto dobu práce neprobíhají. Nedělní denní směna končí již ve 12:00 z důvodů střídání turnusů. Dalším omezením je dostupnost betonu. Stříkaný beton je připravován v betonárně, vzdálené od stavby několik kilometrů. Tato betonárna dodává stříkaný beton v autodomíchávačích pouze v době mezi 10:00-18:00 a 22:00-6:00. Předposlední omezení je pro vrtání mikropilotového deštníku. Tato operace je prováděna subdodavatelem, který provádí práci pouze na denní směně, tudíž v čase od 7:00-19:00. Finálním omezením je omezení samotného klienta na trhací práce, které mohou být prováděny pouze v době od 7:00 do 22:00 v pondělí až sobotu.

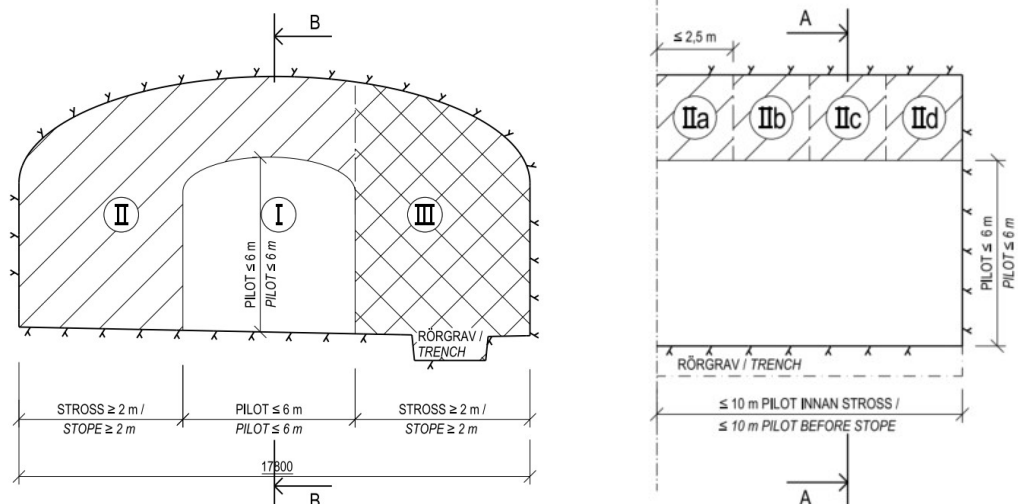
Všechny tyto údaje a omezení byly posléze použity pro tvorbu modelu průběhu prací. Pomocí tohoto modelu bylo tedy ukončení prací dle výchozí dokumentace stanoveno na 2. 9. 2022. Ražba obou tunelů v celé délce 240 metrů by tak trvala 1208 dní. Grafické zpracování je uvedeno v přílohové části diplomové práce.

Jako referenční úsek ražby byl zvolen úsek délky 10 metrů. Na tomto úseku probíhají cyklicky jednotlivé operace dílčích výlomu hlavního tunelu. Po vyražení 10 metrů se opakují procesy injektáže a instalace mikropilotového deštníku. Na tomto referenčním úseku se cyklicky a periodicky střídají všechny operace razícího cyklu.

4.1 Razicí cyklus pro horninovou třídu 4

Ražba v horninové třídě IV začíná operací injektáže, kdy jsou navrtány a zainjektovány dvě kola injektážních vrtů, délky 18 a 16 metrů. Injektáž je prováděna pokaždé po vyražení 10 metrového úseku. Na injektáž navazuje další operace a to instalace mikropilotového deštníku. Jednotlivé piloty mají délku 15 metrů a je jich celkem instalováno 65 kusů. Vrtání mikropilotového deštníku je stejně jako injektáž prováděna po vyražení 10 metrů tunelu následně začínají razicí práce na hlavním tunelu (obrázek 27). Ražba začíná vyražením pilotního tunelu I, dle schématu na obrázku. Tento tunel je vyražen po záběrech 2,5 metrů na délku 10 metrů, kterou dovoluje ochrana mikropilotového deštníku. Ražba pilotního tunelu nezahrnuje instalaci kotev ani trvalého vyztužení stříkaným betonem, ostění je pouze zajištěno 50 mm tlustou vrstvou dočasného stříkaného betonu, která je aplikovaná v každém 2,5 mteru dlouhém záběru. Po vyražení celého pilotního tunelu střídavě probíhá ražba čelby II a III se záběrem 2,5 metrů až do vyražení délky 10 metrů (tabulka 3). Trhací práce na každé čelbě probíhají separátně, projekt nedovoluje ražbu na čelbě II a III současně. Po odstřelu a odtěžení každé zabírky na čelbách II a III je okamžitě nainstalováno veškeré trvalé vyztužení. Nejprve je aplikovaná 50 mm tlustá vrstva stříkaného drátkobetonu, následuje instalace první vrstvy svařovaných sítí, která je zastříkána dalšími 50ti mm prostého stříkaného betonu. Na druhou vrstvu je nainstalována druhá vrstva svařovaných sítí a na závěr je ještě aplikováno ve dvou vrstvách dalších 100 mm prostého stříkaného betonu. Po zatvrdnutí poslední vrstvy betonu jsou do ostění navrtány a následně nainstalovány 5 metrů dlouhé kotvy v rastru 1x2 metry, jako další způsob trvalého vyztužení díla. Po vyražení 10 metrového úseku jsou protaženy lutny a vedení vody a elektřiny. Tímto je ukončena ražba celého 10 metrového úseku a celý cyklus se znovu opakuje. [7]

Vzhledem k výše uvedenému postupu je zřejmé, že dílčí záběry jsou vázány vždy na úsek, který je utěsněný injektáží předpole a zpevněn ochranným mikropilotovým deštníkem. Proto posuzování rychlosti ražby je prováděno na referenčním 10 metrů dlouhém úseku, což je maximální délka která může být vyražena než musí být navrtán další mikropilotový deštník.



Obrázek 26 - Schéma dělení čelby hlavního tunelu v horninové třídě IV

Čelba II						a		b		c		d					
Čelba I			a	b	c	d											
Čelba III							a		b		c		d				
Injektáž	a-d																
MP deštník		a-d															
Protahování luten																	
Portahování el. vedení																	
Protahování vedení vody																	

Tabulka 3 - Schéma postupu ražby na referenčním úseku 10 metrů

Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech dílčích výrubů (tabulka 5) a materiály které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 4). Celkové trvání razícího cyklu se záběrem 2,5 metrů na čelbě I je 12 hodin, razícího cyklu na čelbě II se záběrem 2,5 metrů je 2,13 dne a razícího cyklu III se záběrem 2,5 metrů je 1,65 dne. Dohromady pak trvá vyražení celého průřezu tunelu v horninové třídě IV na délku 10 metrů 26,31 dní, ignorujeme-li časová omezení jednotlivých prací. Bereme-li tato omezení v úvahu pak stejný úsek trvá průměrně 36,65 dní.

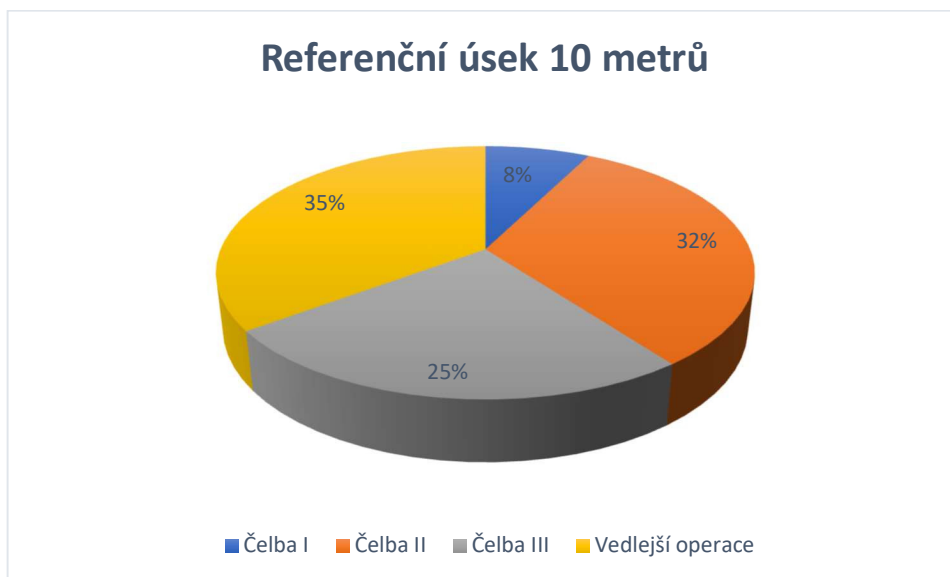
Čelba	I	II	III
Délka záběru [m]	2.5	2.5	2.5
Geometrie			
Plocha průřezu [m2]	34.08	69.43	34.50
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	40.20	51.50	32.63
Objem [m3]	85.20	173.58	86.26
Trhací práce			
Počet vrtů	75.00	110.00	95.00
Délka vrtů celkem [m]	187.50	275.00	237.50
Množství trhavin [kg]	204.48	416.59	207.02
Odtěžba			
Objem vytěžené horniny [m3]	127.80	260.37	129.39
Zarovnávaná plocha [m2]	74.28	120.93	67.13
Trvalé vyztužení			
Stříkaný beton			
Objem [m3]	-	11.33	7.18
Sítě			
Plocha [m2]	-	51.50	32.63
Kotvy			
Počet	-	65	41
Navrtaná délka [m]	-	325	205

Tabulka 4 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách v horninové třídě IV

Čelba	I	II	III	
Trhací práce				
Vrtání	1.50	1.73	1.63	h
Nabíjení	1.45	1.92	1.46	h
Čekací doba	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžba	0.60	1.22	0.60	h
Zarovnání				
Strojové	0.96	1.82	1.12	h
Ruční	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	1.00	1.00	h
Mapování	1.00	1.00	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva				
Dočasný	3.43	-	-	h
Trvalý	-	3.64	3.41	h
Sítě - 1 vrstva	-	6.18	3.92	h
Kotvy				
Vrtání	-	2.03	1.67	h
Instalace	-	4.59	3.35	h

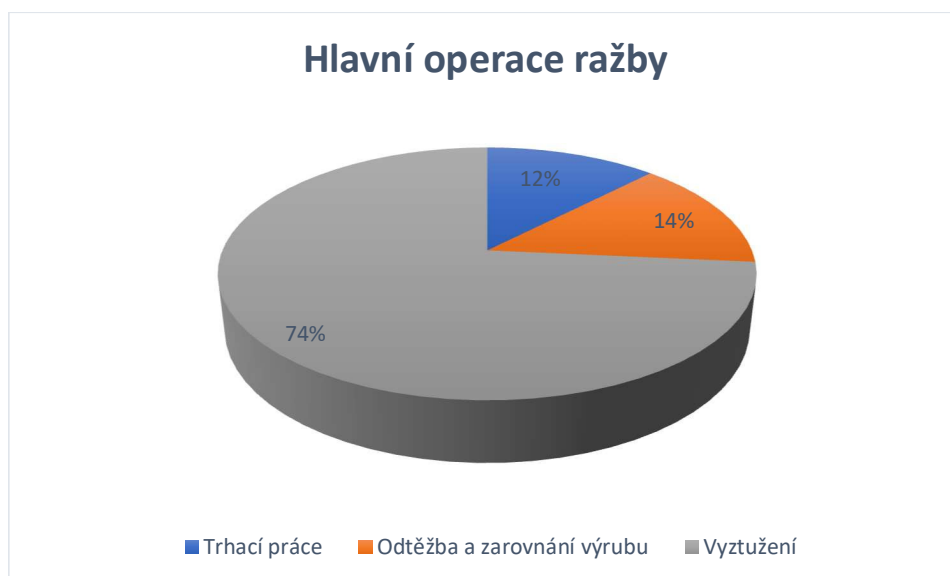
Tabulka 5 - Délka jednotlivých operací ražby v horninové třídě IV

Následující graf (graf 1) vyjadřuje distribuci času mezi jednotlivé hlavní razící cykly. Nejvíce časově náročné jsou vedlejší operace razícího cyklu a operace hlavního cyklu na čelbě II. Vedlejší operace zabírají 35% času potřebného k vyražení 10 metrů dlouhého úseku. Hlavní operace razícího cyklu na čelbě II zabírají 32% času a na čelbě III 25%. Zbývajících 8% odpovídá hlavním operacím na čelbě I.



Graf 1 - Distribuce potřebného času pro ražbu referenčního úseku 10 metrů mezi jednotlivé čelby při ražbě v horninové třídě IV

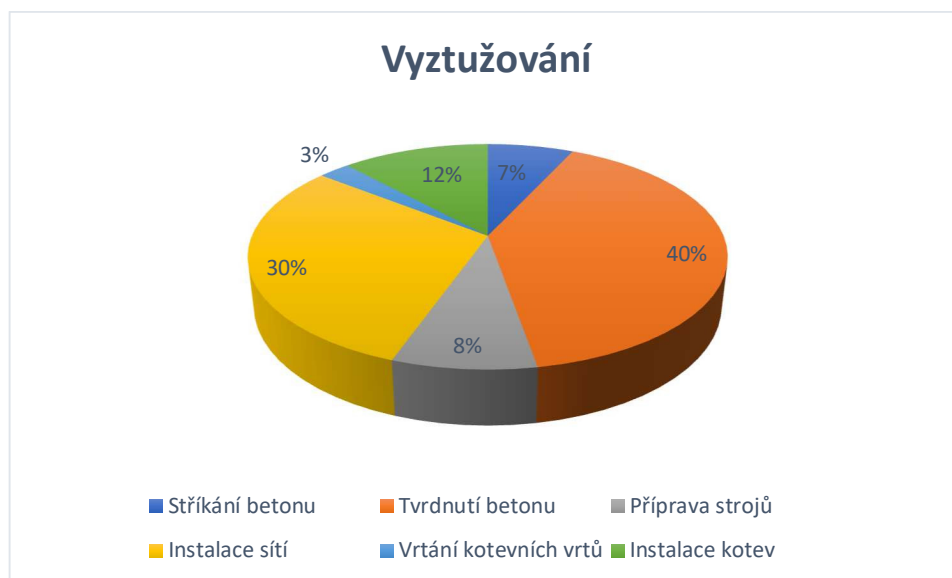
Při bližším pohledu na distribuci času mezi jednotlivé operace hlavního razícího cyklu (graf 2) zjistíme, že většinu času zabírá vyztužování výrubu (74%). Odtěžba a zarovnání výrubu pak tvoří 14% a trhací práce 12%.



Graf 2 - Rozdělení času mezi jednotlivé hlavní operace razícího cyklu

Při detailnějším rozboru operace vyztužování výrubu (Graf 3) lze vidět, že největší část zabírá technická přestávka pro tvrdnutí betonu (40%). Tuto hodnotu lze snižovat pomocí zvětšení objemu aplikovaného betonu v jedné operaci. Zvětšení tloušťky vrstvy aplikovaného betonu není však možné, protože dle technických předpisů stavby může mít jedna vrstva maximálně 50mm. Proto jedinná možnost zvětšení objemu je zvětšení vyztužované plochy,

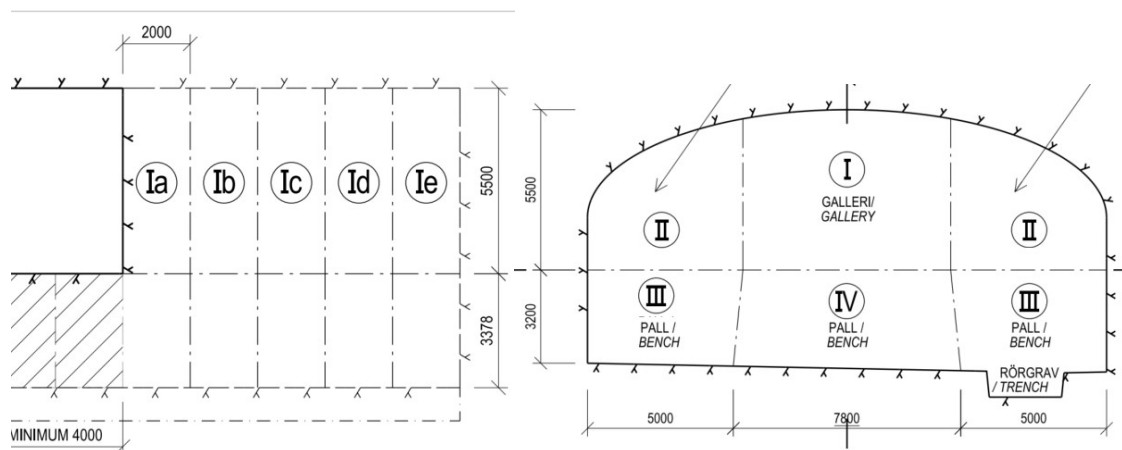
čehož docílíme buď zvětšením zabírky, nebo snížením stupně dělení čelby. Prodloužením zabírky či nižším stupněm dělení by také došlo ke snížení podílu přípravy strojů a růstu podílu ostatních operací.



Graf 3 - Rozdělení času mezi jednotlivé operace vyztužování

4.2 Razicí cyklus pro horninovou třídu V

Začátek ražby v horninové třídě V probíhá stejným způsobem jako v horninové třídě IV. Opět je provedena injektáž a instalace mikropilotového deštníku se stejnými parametry jako v horninové třídě IV. Poté se však postup rozchází. V horninové třídě V přibývá navíc ještě operace stavby rampy o výšce 3,2 m a sklonu 1:7 a instalace dočasných 15 metrů dlouhých čelbových kotev do kaloty díla. Poté přichází na řadu ražba hlavního tunelu (obrázek 28). Nejprve je proveden záběr dílčího výlomu I, potom II levá a nakonec II pravá. Každý výlom má délku záběru 2 metry. Tato posloupnost se periodicky opakuje dokud není vyražená kalota v délce 10 metrů, což znamená 5 záběrů na každé ze tří čeleb (Tabulka 6). Klient má možnost na základě geologického mapování povolit záběr na obou výlomech číslo II současně, nicméně pro posuzování bylo uvažována ražba každého výlomu separátně. Každý dílčí výlom je po trhacích pracech a odtěžení ihned vyztužen. Nejprve je na trvale vyztužovanou plochu výrubu aplikováno 50 mm stříkaného drátkobetonu, po zatvrdnutí aplikováno 50 mm betonu na čelbu jako dočasná výztuž a na původně stříkaný drátkobeton je nainstalována první vrstva svařovaných sítí. Tato vrstva je zastříkána 50ti milimetry prostého stříkaného betonu na kterou je po zatvrdnutí nainstalována druhá vrstva svařovaných sítí. Na druhou vrstvu je nakonec aplikováno 100 mm prostého stříkaného betonu ve dvou vrstvách po 50 mm. Po zatvrdnutí celé betonové vrstvy jsou navrtány a následně osazeny kotvy délky 5 metrů v rastru 1x2 metrů, jako další způsob trvalého vyztužení díla. Po vyražení a vyztužení kaloty je rampa odstraněna a probíhá dobírka dna. Dno je také rozděleno na tři dílčí výlomy s délkou záběru 2 metry. První probíhá ražba výlomu III levá, následně III pravá a nakonec výlom IV. Tato posloupnost se opakuje dokud není vyraženo 10 metrů tunelu, což znamená 5 záběrů na každém dílčím výlomu (tabulka 7). Výlomy III jsou ihned po odtěžení opět kompletně vyztužovány téměř stejným způsobem jako v kalotě, jedinný rozdíl je v dočasném vyztužení čelby, které se v čelbě dna díla neaplikuje. Výlom IV tvoří opěrnou lavici pro čelbu a není nijak vyztužován. Ražba obou výlomů III současně není dle projektové dokumentace povolena. Projektová dokumentace také ukládá, že výlom IV musí být oproti výlomům III opožděn o minimálně 4 metry, to znamená 2 zabírky při délce 2 metry. Není-li tato délka dodržena, je ražba výlomu IV pozastavena, dokud nebude tato podmínka splněna. Celý proces je ukončen protažením luten a vedení elektriny a vody. Poté celý proces začíná od začátku těsnicí injektáží.



Obrázek 27 - Schéma dělení čelby v horninové třídě V

Čelba II- levá						a			b			c			d			e	
Čelba I					a				b			c			d			e	
Čelba II - pravá							a			b			c			d			e
Injektáž	a-e																		
MP deštník		a-e																	
Instalace čelbových kotev																			
Stavba rampy																			

Tabulka 6 - Schéma časové posloupnosti ražby kaloty hlavního tunelu v horninové třídě V

Čelba III- levá		a			b			c			d			e					
Čelba IV				a		b		c			d			e					
Čelba III - pravá			a		b			c			d			e					
Protahování luten																			
Protahování el. vedení																			
Protahování vedení vody																			
Odstranění rampy																			

Tabulka 7 - Schéma časové posloupnosti ražby dna hlavního tunelu v horninové třídě V

Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech (tabulka 9) a materiály které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 8). Celkové trvání razícího cyklu na čelbě I se záběrem 2 metry je 1,43 dní, razícího cyklu čelbě II se záběrem 2 metry je 1,38 dní, razícího cyklu na čelbě III se záběrem 2 metry je 1 den a razícího cyklu na čelbě IV se záběrem 2 metry je 0,26 dní. Vyražení celého průřezu na délku 10 metrů pak zabírá dohromady 41,95 dní, ignorujeme-li časová omezení jednotlivých prací. Bereme-li tato omezení v úvahu pak vyražení stejného úseku trvá průměrně 61,65 dní.

Čelba	I	II	III	IV
Délka záběru [m]	2	2	2.0	2.0
Geometrie				
Plocha průřezu [m2]	41.40	19.83	16.00	24.96
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	17.00	18.60	6.40	-
Objem [m3]	82.80	39.66	32.00	49.92
Trhací práce				
Počet vrtů	55.00	45.00	43.00	52.00
Délka vrtů celkem [m]	110.00	90.00	86.00	104.00
Množství trhaviny [kg]	198.72	95.18	76.80	119.81
Odtěžba				
Objem vytěžené horniny [m3]	124.20	59.49	48.00	74.88
Zarovnávaná plocha [m2]	58.40	38.43	22.40	24.96
Trvalé vyztužení				
Stříkaný beton				
Objem [m3]	3.4	3.72	1.28	-
Sítě				
Plocha [m2]	34	37.2	12.8	-
Kotvy				
Počet	17	19	7	-
Navrtaná délka [m]	85	95	35	-

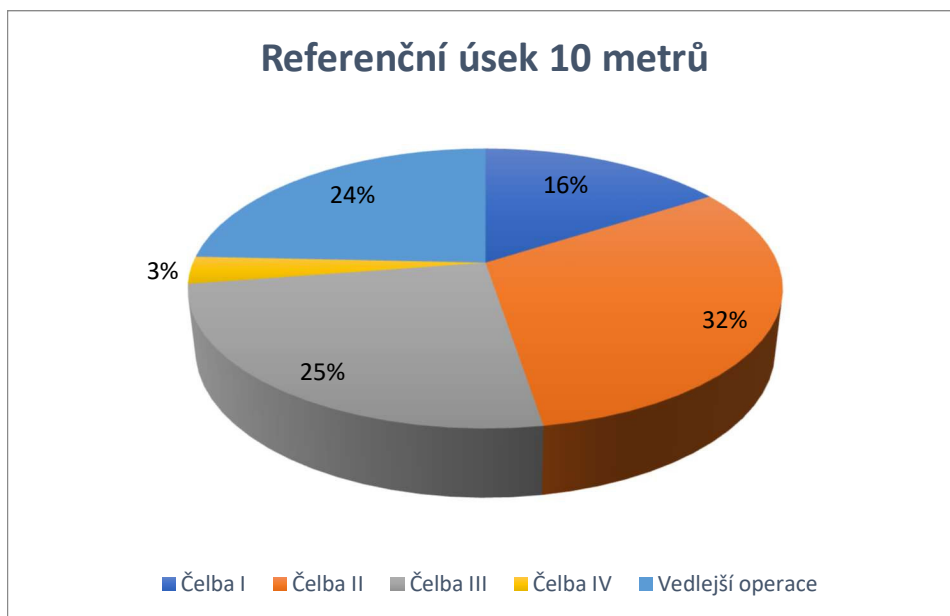
Tabulka 8 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách v horninové třídě V

Čelba	I	II	III	IV	
Trhací práce					
Vrtání	1.29	1.24	1.23	1.28	h
Nabíjení	1.44	1.21	1.17	1.26	h
Čekací doba	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžba	0.58	0.28	0.22	0.35	h
Zarovnání					
Strojové	1.02	0.50	0.29	0.32	h
Ruční	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Mapování	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva					
Dočasný	3.52	3.25	-	-	h
Trvalý	3.34	3.23	3.08	-	h
Sítě - 1 vrstva	2.04	2.23	0.77	-	h
Kotvy					
Vrtání	1.67	1.75	1.28	-	h
Instalace	3.35	3.62	1.97	-	h

Tabulka 9 - Délka jednotlivých operací ražby v horninové třídě IV

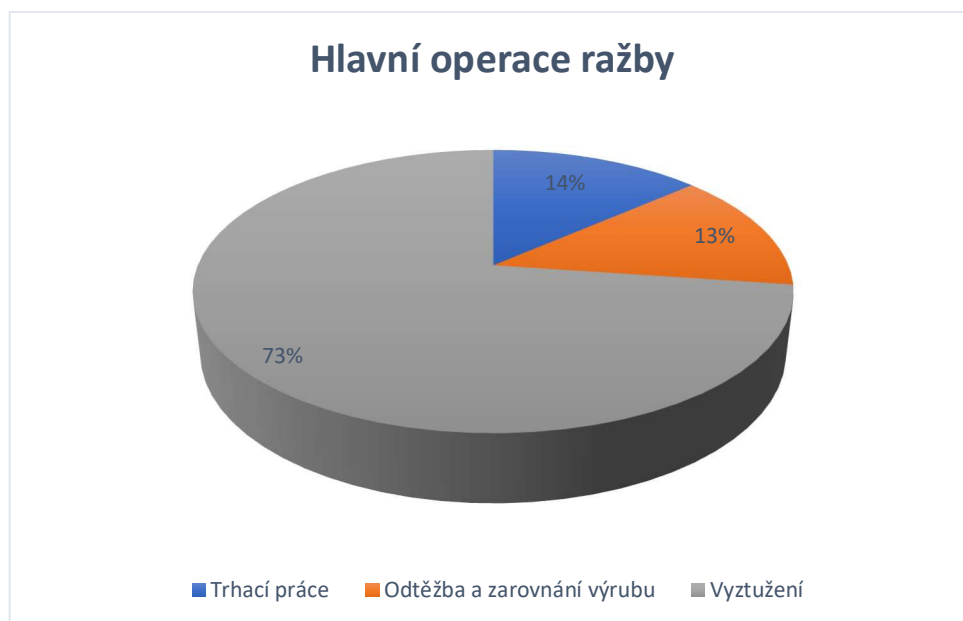
Následující graf (graf 4) zachycuje rozdělení času pro vyražení 10 metrů tunelu mezi jednotlivé čelby. Nejvíce času zabírají razící cykly na čelbách II a III, odpovídající 32% a 25%

25% celkového času. Následují vedlejší operace razícího cyklu (24%) a razící cyklus na čelbě III (16%). Nejnižší podíl (3%) pak má razící cyklus na čelbě číslo IV. Velké rozdíly mezi hlavními cykly jsou zapříčiněny především rozdíly ve vyztužované ploše, kdy nejdelší cyklus (čelba II) vyztužuje $2 \times 37,2 \text{ m}^2$, zatímco nejkratší cyklus (čelba IV) nevyztužuje vůbec.



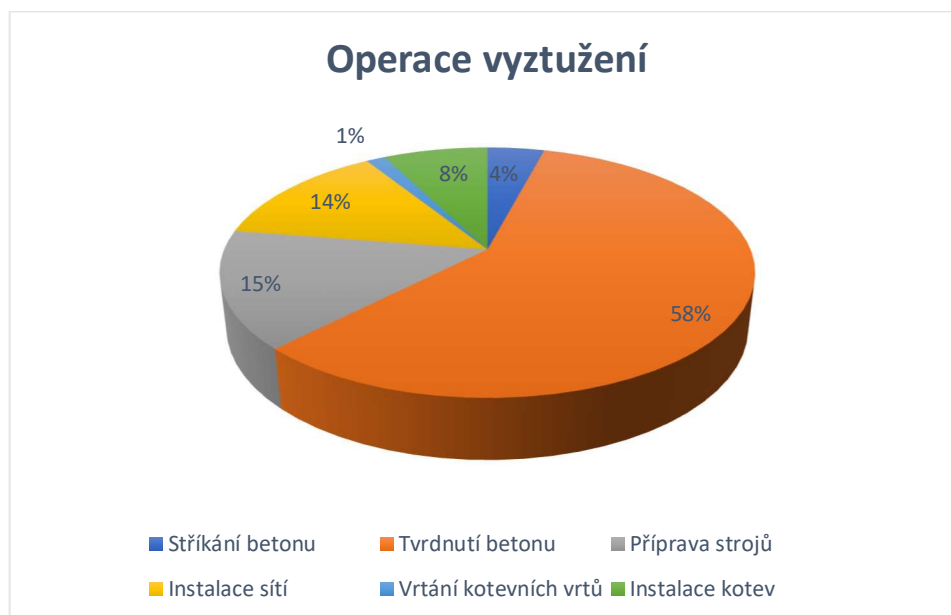
Graf 4 - Distribuce potřebného času pro ražbu referenčního úseku 10 metrů mezi jednotlivé čelby při ražbě v horninové třídě V

Podíl jednotlivých hlavních operací na razícím cyklu v horninové třídě V je téměř totožný s tím pro horninovou třídu IV (graf 5). Opět většinové zastoupení mají operace vyztužení (73%) následovány trhacími pracemi (14%) a nakonec odtěžbou (13%)



Graf 5 - Rozdělení času mezi jednotlivé hlavní operace ražby

Při bližším rozboru operace vyztužení (graf 6) lze vidět, že největší část tvoří, stejně jako u třídy IV, technická přestávka pro tvrdnutí betonu (58%). Dalších 15% pak náleží přípravě strojů. Oba tyto časy budou výrazně redukovány zvýšením objemu prací v každém cyklu. Poslední významnou část tvoří instalace svařovaných sítí, která však bez změny technologie není možná výrazně zefektivnit.



Graf 6 - Rozdělení času pro vyztužování mezi jednotlivé operace

4.3 Vedlejší operace ražby

Do kategorie vedlejších operací ražby se celkem řadí šest operací – instalace mikropilotového deštníku, injektáž předpolí, vyztužování čelby samozávrtnými kotvami, stavba rampy, odstranění rampy, prodlužování luten a prodlužování instalací (elektrina, voda).

Injektáž		
Počet kol	2	ks
Na kolo		
Počet děr	32	ks
Celková délka vrtů	512	m
Množství cementu	1152	kg
MP deštník		
Počet pilot	65	ks
Celková délka vrtů pro piloty	975	m
Radiální kotvy		
Počet kotev	32	ks
Délka celkem	160	m
Čelbové kotvy		
Počet	28	ks
Celková délka	420	m

Tabulka 10 - Množství materiálu a objemu práce vyžadované pro jednotlivé vedlejší operace

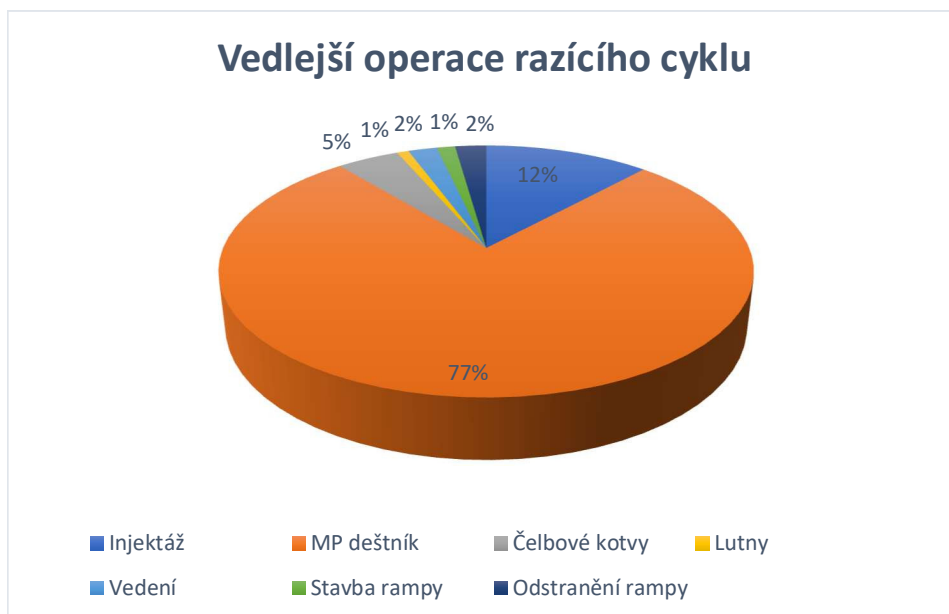
Injektáž		
Vrtání	6.88	h
Injektování	7.38	h
MP deštník		
Vrtání	162.50	h
Injektáž	5.36	h
Zastříkání	7.5	h
Radiální kotvy		
Vrtání	5.6	
Instalace	4.42	
Čelbové kotvy		
Vrtání	3.86	h
Aktivace	2.85	h
Stavba rampy	3.2	h
Odstranění rampy	5.4	h
Protažení luten	2	h
Protažení vedení el. a vody	5	h

Tabulka 11 - Čas potřebný pro vykonání jednotlivých operací

Operace stavba mikropilotového deštníku, injektáž, protažení luten a protažení vedení elektriny a vody jsou prováděny každých 10 metrů, nezávisle na horninové třídě, ve které ražba

probíhá. Probíhá-li ražba v horninové třídě V pak je před prvním záběrem v kalotě díla ještě zbudována rampa a instalovány čelbové kotvy. A podoražení kaloty na délku 10 metrů je naopak rampa odstraněna.

Při detailu (graf 7) vedlejších operací lze vidět, že největší část tvoří instalace mikropilotového deštníku (77%) a druhou největší část tvoří injektáž.



Graf 7 - Rozdělení požadovaného času mezi jednotlivé vedlejší operace

5 Optimalizace razícího cyklu

5.1 Optimalizace ražby v horninové třídě IV

Na základě předchozí analýzy jsou navrženy k posouzení následující kroky k optimalizaci ražby v horninové třídě IV:

1. Snížení dělení čelby na vertikální dělení na dva dílčí výlomy
2. Ražba na plný profil
3. Prodloužení záběru na 3,33 metrů
4. Prodloužení záběru na 5 metrů

5.1.1 Vertikální dělení čelby na dva dílčí výlomy

Prvním návrhem optimalizace čelby je snížení dělení čelby na pouze dva dílčí výlomy rozdělené vertikálně. Tato změna tedy vylučuje ražbu pilotního tunelu, tudíž vypouští stavbu veškerého dočasného vyztužení. Nicméně instalace trvalého vyztužení díla bude stále rozdělena na dvě části, tudíž nedojde ke snížení podílu této operace na cyklu. Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech (tabulka 13) a materiály které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 12).

Čelba	I	II
Délka záběru [m]	2.5	3.5
Geometrie		
Plocha průřezu [m2]	69.01	69.01
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	42.06	42.05
Objem [m3]	172.52	172.52
Trhací práce		
Počet vrtů	140.00	140.00
Délka vrtů celkem [m]	350.00	350.00
Množství trhaviny [kg]	414.05	414.05
Odtěžba		
Objem vytěžené horniny [m3]	258.78	258.78
Zarovnávaná plocha [m2]	132.82	111.06
Trvalé vyztužení		
Stříkaný beton		
Objem [m3]	8.4125	8.41
Sítě		
Plocha [m2]	84.125	84.1
Kotvy		
Počet	53	53
Navrtaná délka [m]	265	265

Tabulka 12 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách

Čelba	I	II	
Trhací práce			
Vrtání	2.06	2.06	h
Nabíjení	1.91	1.91	h
Čekací doba	1.00	1.00	h
Odtěžba	1.21	1.21	h
Zarovnání			
Strojové	1.71	1.43	h
Ruční	1.00	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	1.00	h
Mapování	1.00	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva			
Dočasný	-	-	h
Trvalý	3.53	3.53	h
Sítě - 1 vrstva	5.05	5.05	h
Kotvy			
Vrtání	3.10	3.10	h
Instalace	8.30	8.30	h

Tabulka 13 - Délka jednotlivých operací ražby

Aplikací této optimalizace dojde ke snížení času potřebného vyražení 10ti metrů tunelu z 26,31 dne na 24,66 dne. To odpovídá zrychlení o 6,3%.

5.1.2 Ražba na plný profil

Dalším krokem možným pro optimalizace je ražba na plný profil. Tento způsob oproti původnímu způsobu ražby vylučuje stavbu pilotního tunelu, tudíž i dočasné vyztužení a spojuje operace trvalého vyztužení do jedné, čímž hlavně redukuje čas pro technickou přestávku na tvrdnutí betonu, ale také čas pro přípravu strojů. Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech (tabulka 15) a materiály které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 14).

Čelba	l
Délka záběru [m]	2.5
Geometrie	
Plocha průřezu [m2]	138.02
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	84.13
Objem [m3]	345.04
Trhací práce	
Počet vrtů	280.00
Délka vrtů celkem [m]	700.00
Množství trhaviny [kg]	828.09
Odtěžba	
Objem vytěžené horniny [m3]	517.56
Zarovnávaná plocha[m2]	222.14
Trvalé vyztužení	
Stříkaný beton	
Objem [m3]	16.825
Sítě	
Plocha [m2]	168.25
Kotvy	
Počet	106
Navrtná délka [m]	530

Tabulka 14 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách

Čelba	I	
Trhací práce		
Vrtání	2.85	h
Nabíjení	2.82	h
Čekací doba	1.00	h
Odtěžba	2.42	h
Zarovnání		
Strojové	2.87	h
Ruční	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	h
Mapování	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva		
Dočasný	-	h
Trvalý	4.05	h
Sítě - 1 vrstva	10.09	h
Kotvy		
Vrtání	5.21	h
Instalace	15.63	h

Tabulka 15 - Délka jednotlivých operací ražby

Aplikací navržené optimalizace dojde k redukci časové náročnosti na ražbu 10ti metrů tunelu na 21,23 dne. Což odpovídá zrychlení oproti výchozímu stavu o 22,3% a oproti ražbě na dva výlomy o 13,9%.

5.1.3 Prodloužení záběru na 3,33 metrů

Druhým způsobem optimalizace ražby je prodloužení záběru na 3,33metrů, čímž dojde ke snížení záběrů v jednom hodnoceném úseku na 3 místo výchozích 4. Tím dojde ke zmenšení počtu částí na které je vyztužovaná plocha rozdělená a tím pádem i redukci technického času pro tvrdnutí betonu a přípravu strojů. Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech (tabulka 17) a materiály které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 16).

Čelba	I	II	III
Délka záběru [m]	3.33	3.33	3.3
Geometrie			
Plocha průřezu [m2]	34.08	69.43	34.50
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	-	68.60	43.46
Objem [m3]	113.49	231.21	114.90
Trhací práce			
Počet vrtů	75.00	110.00	95.00
Délka vrtů celkem [m]	249.75	366.30	316.35
Množství trhaviny [kg]	272.37	554.89	275.75
Odtěžba			
Objem vytěžené horniny [m3]	170.23	346.81	172.35
Zarovnávaná plocha[m2]	87.63	138.03	77.96
Trvalé vyztužení			
Stříkaný beton			
Objem [m3]	-	13.7196	8.69
Sítě			
Plocha [m2]	-	68.60	43.46
Kotvy			
Počet	-	115	73
Navrtaná délka [m]	-	575	365

Tabulka 16 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách

Čelba	I	II	III	
Trhací práce				
Vrtání	1.66	1.97	1.84	h
Nabíjení	1.60	2.22	1.61	h
Čekací doba	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžba	0.79	1.62	0.80	h
Zarovnání				
Strojové	1.13	2.12	1.35	h
Ruční	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	1.00	1.00	h
Mapování	1.00	1.00	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva				
Dočasný	3.67	-	-	h
Trvalý	-	3.86	3.54	h
Sítě - 1 vrstva	-	8.23	5.21	h
Kotvy				
Vrtání	-	5.56	3.90	h
Instalace	-	16.87	11.07	h

Tabulka 17 - Délka jednotlivých operací ražby

Prodloužením záběru dojde ke snížení délky ražby hodnoceného úseku 10ti metrů na 25,23 dní. To odpovídá zrychlení o 7,6% oproti výchozímu stavu.

5.1.4 Prodloužení záběru na 5 metrů

Prodloužením záběru na 5 metrů dojde ke snížení záběrů na hodnoceném úseku na 2. Tím dojde stejně jako v předchozím případě ke snížení technického času pro tvrdnutí betonu a přípravy strojů. Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech (tabulka 19) a materiály které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 18).

Čelba	I	II	III
Délka záběru [m]	5	5	5.0
Geometrie			
Plocha průřezu [m2]	34.08	69.43	34.50
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	-	103.00	65.25
Objem [m3]	170.40	347.16	172.52
Trhací práce			
Počet vrtů	75.00	110.00	95.00
Délka vrtů celkem [m]	375.00	550.00	475.00
Množství trhaviny [kg]	408.96	833.18	414.05
Odtěžba			
Objem vytěžené horniny [m3]	255.60	520.73	258.78
Zarovnávaná plocha [m2]	114.48	212.43	139.75
Trvalé vyztužení			
Stříkaný beton			
Objem [m3]	-	20.6	13.05
Sítě			
Plocha [m2]	-	206.00	130.50
Kotvy			
Počet	-	155	98
Navrtaná délka [m]	-	775	490

Tabulka 18 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách

Čelba	I	II	III	
Trhací práce				
Vrtání	1.99	2.46	2.26	h
Nabíjení	1.90	2.83	1.91	h
Čekací doba	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžba	1.19	2.43	1.21	h
Zarovnání				
Strojové	1.48	2.74	1.80	h
Ruční	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	1.00	1.00	h
Mapování	1.00	1.00	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva				
Dočasný	4.00	-	-	h
Trvalý	-	4.29	3.82	h
Sítě - 1 vrstva	-	12.36	7.83	h
Kotvy				
Vrtání	-	7.15	4.88	h
Instalace	-	22.39	14.52	h

Tabulka 19 - Délka jednotlivých operací ražby

Prodloužením záběru na 5 metrů dojde ke snížení trvání vyražení 10ti metrů tunelu na 22,7 dní. To odpovídá zrychlení 16,9% oproti výchozímu makrocyklu a 10% oproti makrocyklu se záběrem 3,33 metrů.

5.1.5 Výsledný návrh

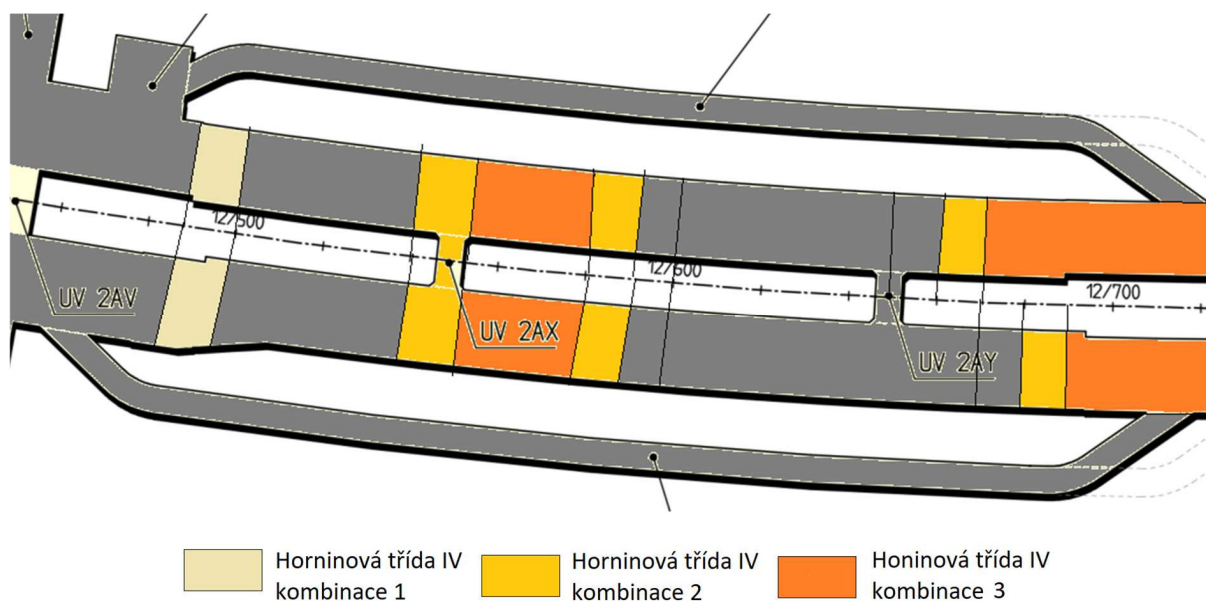
Ve výsledném návrhu celé trasy budou na základě výsledků konvergenčních měření z bypass tunelů (viz kapitola 6) použity tyto kombinace optimalizací:

1. Čelba dělená na 2 části se záběrem 2,5 metrů
2. Ražba na plný profil se záběrem 3,33 metrů
3. Ražba na plný profil se záběrem 5 metrů

Kombinace číslo 1 je již popsána v kapitole 5.1.1. tato varianta bude aplikována na 20 metrů z celkové délky ražby (obrázek 29).

Kombinace číslo 2 bude aplikována na 60 metrů z celkové délky ražby. Tato kombinace zrychluje ražbu o 28,9% na 19,44 dní za 10 metrů ražby, v porovnání s výchozím způsobem ražby (obrázek 29).

Kombinace číslo 3 je aplikována na 160 metrů ražby. Tato kombinace zrychluje ražbu o 31,9% na 18,61 dní za 10 metrů tunelu, v porovnání s výchozím stavem (obrázek 29).



Obrázek 28 - Rozložení navržených kombinací pro horninovou třídu IV v trase díla

5.2 Optimalizace ražby v horninové třídě V

Na základě předchozí analýzy jsou navrženy k posouzení následující kroky k optimalizaci ražby v horninové třídě V:

1. Snížení dělení čelby na kombinované dělení na tři dílčí výlomy
2. Snížení dělení čelby na vertikální dělení na dva dílčí výlomy
3. Prodloužení záběru na 2,5 metrů
4. Prodloužení záběru na 3,33 metrů

5.2.1 Snížení dělení čelby na kombinované dělení na tři dílčí výlomy

Prvním způsobem optimalizace ražby v horninové třídě V je zmenšení počtu dílčích výlomů čelby na kalotu a dno vertikálně rozdělené na dvě části. Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech (tabulka 21) a materiály, které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 20).

Čelba	I	II	III
Délka záběru [m]	2	2	2
Geometrie			
Plocha průřezu [m2]	83.62	28.48	28.48
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	54.50	6.40	6.40
Objem [m3]	167.24	56.96	56.96
Trhací práce			
Počet vrtů	160.00	65.00	65.00
Délka vrtů celkem [m]	320.00	130.00	130.00
Množství trhaviny [kg]	401.38	136.70	136.70
Odtěžba			
Objem vytěžené horniny [m3]	250.86	85.44	85.44
Zarovnávaná plocha [m2]	138.12	34.88	34.88
Trvalé vyztužení			
Stříkaný beton			
Objem [m3]	10.9	1.28	1.28
Sítě			
Plocha [m2]	109	12.8	12.8
Kotvy			
Počet	55	7	7
Navrtaná délka [m]	275	35	35

Tabulka 20 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách

Čelba	I	II	III	
Trhací práce				
Vrtání	1.85	1.34	1.34	h
Nabíjení	1.88	1.30	1.30	h
Čekací doba	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžba	1.17	0.40	0.40	h
Zarovnání				
Strojové	1.78	0.66	0.45	h
Ruční	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	1.00	1.00	h
Mapování	1.00	1.00	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva				
Dočasný	4.04	-	-	h
Trvalý	3.63	3.08	3.08	h
Sítě - 1 vrstva	6.54	0.77	0.77	h
Kotvy				
Vrtání	3.18	1.28	1.28	h
Instalace	8.59	1.97	1.97	h

Tabulka 21 - Délka jednotlivých operací ražby

Aplikací této optimalizace dojde ke snížení času potřebného pro vyražení 10ti metrů díla z 41,95 dní na 31,27 dne. To odpovídá zrychlení o 25,5%.

5.2.2 Snížení dělení čelby na vertikální dělení na dva dílčí výlomy

Druhý způsob optimalizace ražby v horninové třídě V rozšiřuje způsob popsáný v kapitole 5.2.1. Tento způsob mění dělení čelby na vertikální s dvěma výlomy, ruší dočasné vyztužení čelby kotvami a stříkaným betonem a také již nevyžaduje stavbu a odstranění rampy. Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech (tabulka 23) a materiály které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 22).

Čelba	I	II
Délka záběru [m]	2	2
Geometrie		
Plocha průřezu [m2]	69.01	69.01
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	33.64	33.64
Objem [m3]	138.02	138.02
Trhací práce		
Počet vrtů	140.00	140.00
Délka vrtů celkem [m]	280.00	280.00
Množství trhaviny [kg]	331.24	331.24
Odtěžba		
Objem vytěžené horniny [m3]	207.02	207.02
Zarovnávaná plocha [m2]	120.05	102.65
Trvalé vyztužení		
Stříkaný beton		
Objem [m3]	6.728	6.728
Sítě		
Plocha [m2]	67.28	67.28
Kotvy		
Počet	34	34
Navrtaná délka [m]	170	170

Tabulka 22 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách

Čelba	I	II	
Trhací práce			
Vrtání	1.74	1.74	h
Nabíjení	1.73	1.73	h
Čekací doba	1.00	1.00	h
Odtěžba	0.97	0.97	h
Zarovnání			
Strojové	1.55	1.32	h
Ruční	1.00	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	1.00	h
Mapování	1.00	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva			
Dočasný	-	-	h
Trvalý	3.42	3.42	h
Sítě - 1 vrstva	4.04	4.04	h
Kotvy			
Vrtání	2.35	2.35	h
Instalace	5.69	5.69	h

Tabulka 23 - Délka jednotlivých operací ražby

Aplikací této optimalizace dojde ke snížení času potřebného pro vyražení 10ti metrů díla z 41,95 dní na 26,24 dní. To odpovídá zrychlení o 38,4% oproti původnímu stavu a 16,1% oproti dělení na 3 výlomy.

5.2.3 Prodloužení záběru na 2,5 metrů

Dalším způsobem optimalizace ražby je prodloužení záběru na 2,5 metrů, čímž dojde ke snížení záběrů na hodnoceném úseku na 4 místo výchozích 5. Tím dojde ke zmenšení počtu částí na které je vyztužovaná plocha rozdělena a tím pádem i redukci technického času pro tvrdnutí betonu a přípravu strojů. Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech (tabulka 25) a materiály které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 24).

Čelba	I	II	III	IV
Délka záběru [m]	2.5	2.5	2.5	2.5
Geometrie				
Plocha průřezu [m2]	41.40	19.83	16.00	24.96
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	21.25	23.25	8.00	-
Objem [m3]	103.50	49.58	40.00	62.40
Trhací práce				
Počet vrtů	55.00	45.00	43.00	52.00
Délka vrtů celkem [m]	137.50	112.50	107.50	130.00
Množství trhaviny [kg]	248.40	118.98	96.00	149.76
Odtěžba				
Objem vytěžené horniny [m3]	155.25	74.36	60.00	93.60
Zarovnávaná plocha[m2]	88.65	43.08	24.00	24.96
Trvalé vyztužení				
Stříkaný beton				
Objem [m3]	4.25	4.65	1.6	-
Sítě				
Plocha [m2]	42.5	46.5	16	-
Kotvy				
Počet	27	30	10	-
Navrtaná délka [m]	135	150	50	-

Tabulka 24 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách

Čelba	I	II	III	IV	
Trhací práce					
Vrtání	1.36	1.30	1.28	1.34	h
Nabíjení	1.55	1.26	1.21	1.33	h
Čekací doba	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžba	0.73	0.35	0.28	0.44	h
Zarovnání					
Strojové	1.14	0.56	0.31	0.32	h
Ruční	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Mapování	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva					
Dočasný	3.52	3.25	-	-	h
Trvalý	3.46	3.29	3.10	-	h
Sítě - 1 vrstva	2.55	2.79	0.96	-	h
Kotvy					
Vrtání	2.07	2.19	1.40	-	h
Instalace	4.73	5.14	2.38	-	h

Tabulka 25 - Délka jednotlivých operací ražby

Aplikací této optimalizace dojde ke snížení času potřebného pro vyražení 10ti metrů díla z 41,95 dní na 37,73 dní. To odpovídá zrychlení o 10,1% oproti původnímu stavu.

5.2.4 Prodloužení záběru na 3,33 metrů

Tento způsob optimalizace ražby v horninové třídě V rozšiřuje způsob popsany v kapitole 5.2.3. Dále zvětšuje délku záběru na 3,33 metrů, čímž snižuje počet záběrů na hodnoceném úseku na 3. Do následující tabulky byly zaznamenány časy jednotlivých operací v jednotlivých cyklech (tabulka 27) a materiály které budou v daném cyklu nainstalovány či objem provedených prací (tabulka 26).

Čelba	I	II	III	IV
Délka záběru [m]	3.33	3.33	3.33	3.33
Geometrie				
Plocha průřezu [m2]	41.40	19.83	16.00	24.96
Trvale vyztužovaná plocha [m2]	28.31	30.97	10.66	-
Objem [m3]	137.86	66.03	53.28	83.12
Trhací práce				
Počet vrtů	55.00	45.00	43.00	52.00
Délka vrtů celkem [m]	183.15	149.85	143.19	173.16
Množství trhaviny [kg]	330.87	158.48	127.87	199.48
Odtěžba				
Objem vytěžené horniny [m3]	206.79	99.05	79.92	124.68
Zarovnávaná plocha [m2]	104.34	50.80	26.66	24.96
Trvalé vyztužení				
Stříkaný beton				
Objem [m3]	5.66	6.19	2.13	-
Sítě				
Plocha [m2]	56.61	61.94	21.31	-
Kotvy				
Počet	48	52	18	-
Navrtaná délka [m]	240	260	90	-

Tabulka 26 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách

Čelba	I	II	III	IV	
Trhací práce					
Vrtání	1.48	1.40	1.38	1.46	h
Nabíjení	1.73	1.35	1.28	1.44	h
Čekací doba	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžba	0.97	0.46	0.37	0.58	h
Zarovnání					
Strojové	1.35	0.66	0.34	0.32	h
Ruční	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Odtěžení po zarovnání	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Mapování	1.00	1.00	1.00	1.00	h
Stříkaný beton - 1 vrstva					
Dočasný	3.52	3.25	-	-	h
Trvalý	3.66	3.39	3.13	-	h
Sítě - 1 vrstva	3.40	3.72	1.28	-	h
Kotvy					
Vrtání	2.90	3.06	1.71	-	h
Instalace	7.60	8.18	3.48	-	h

Tabulka 27 - Délka jednotlivých operací ražby

Aplikací této optimalizace dojde ke snížení času potřebného k vyražení 10ti metrů díla z 41,95 dní na 33,88 dní. To odpovídá zrychlení o 19,3% oproti původnímu stavu a 10,3% oproti záběru 2,5 m.

5.2.5 Výsledný návrh

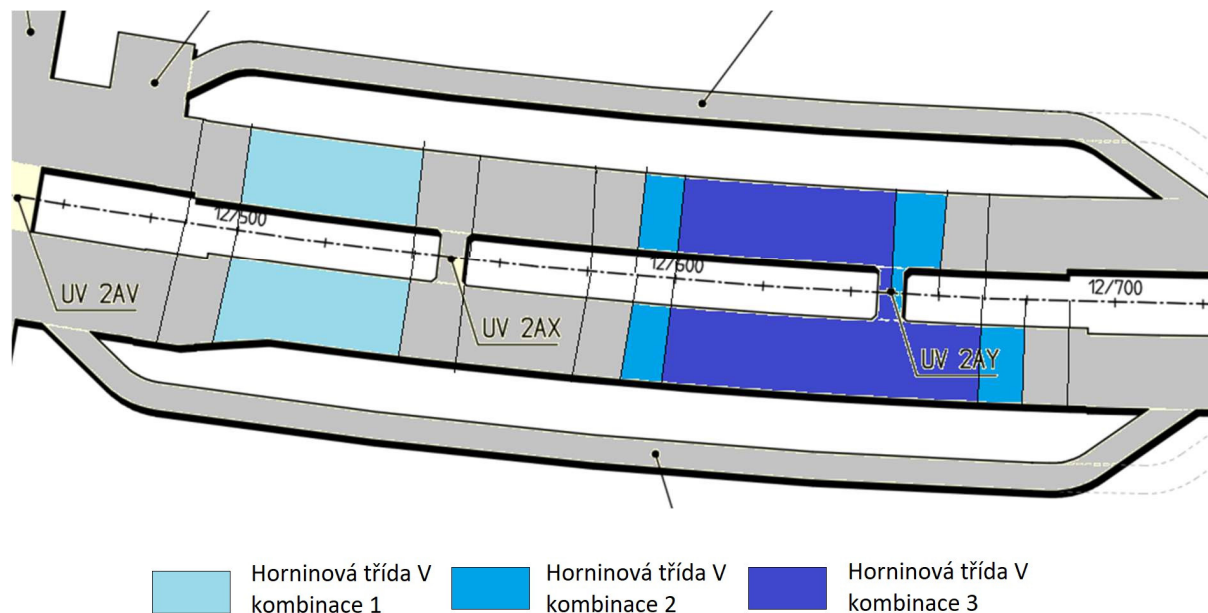
Ve výsledném návrhu celé trasy budou na základě výsledků konvergenčních měření z bypass tunelů (viz kapitola 6) použity tyto kombinace optimalizací:

1. Čelba dělená na tři části se záběrem 2 metry
2. Čelba dělená na dvě části se záběrem 2,5 metry
3. Čelba dělená na dvě části se záběrem 3,33 metry

Kombinace číslo 1 bude aplikovaná na 80 metrů z celkové délky ražby (obrázek 30). Tato kombinace byla již popsána v kapitole 5.2.1.

Kombinace číslo 2 bude aplikovaná na 120 metrů z celkové délky ražby (obrázek 30). Tato kombinace zrychluje ražbu o 40,2% na 25,12 dní na hodnoceném úseku v porovnání s výchozím způsobem ražby.

Kombinace číslo 3 bude aplikovaná na 40 metrů z celkové délky ražby (obrázek 30). Tato kombinace zrychluje ražbu o 41,8% na 24,41 dní na hodnoceném úseku v porovnání s výchozím způsobem ražby.



Obrázek 29 - Rozložení navržených kombinací pro horninovou třídu V v trase díla

5.3 Optimalizace vedlejších operací ražby

Na základě předchozí analýzy jsou navrženy k posouzení následující kroky k optimalizaci vedlejších operací razícího cyklu:

1. Snížení kol těsnicí injektáže s testem těsnosti
2. Snížení počtu mikropilot v deštníku na 44

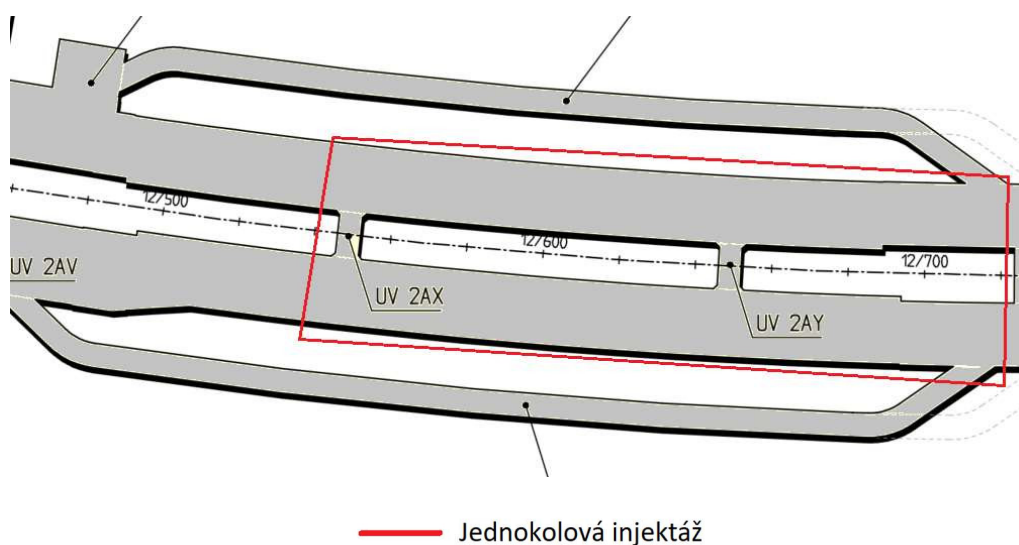
V rámci návrhů v kapitole 5.2.2 již došlo k úpravě vedlejších operací instalace čelbových kotev, stavba a odstranění rampy. Tyto operace byly při návrhu odstraněny.

5.3.1 Injektáž

Na základě měření konvergencí v průběhu ražby bypass tunelů je navrženo snížení kol těsnicí injektáže na 1, za předpokladu, že prokázána těsnost horninového masivu pomocí tzv. Lugeon testu, po prvním kole injektáže. Trvání tohoto testu je 2 hodiny.

Tím dojde ke snížení operací těsnicí injektáže z původních 28,56 hodin na 16,26. To odpovídá zrychlení operace o 43,1%.

Tato optimalizace bude aplikována až od staničení 12/540 (obrázek 31), kde se ražba dostane za nejkritičtější oblast celého úseku.



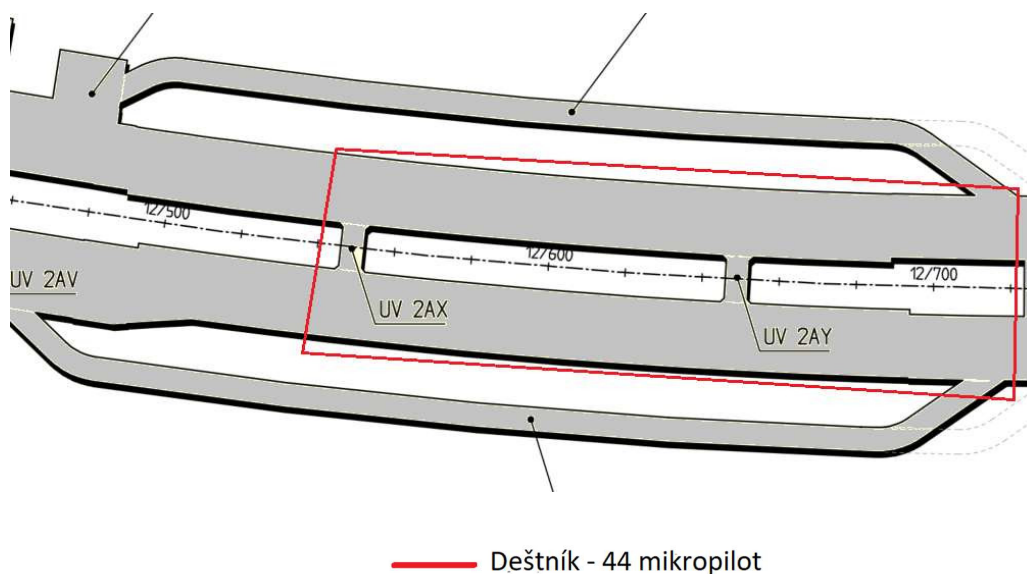
Obrázek 30 – Označení oblasti pro aplikaci návrhu

5.3.2 Mikropilotový deštník

Dalším návrhem je snížení počtu mikropilot v každém mikropilotovém deštníku na 44. Tato úprava je taktéž navržena na základě měření konvergencí v průběhu ražby bypass tunelů. Tato úprava omezí mikropilotový deštník pouze na strop a rohy díla a vypouští jej ve stěnách.

Tím dojde ke snížení operací těsnící injektáže z původních 7,72 dní na 5,23. To odpovídá zrychlení operace o 32,3%.

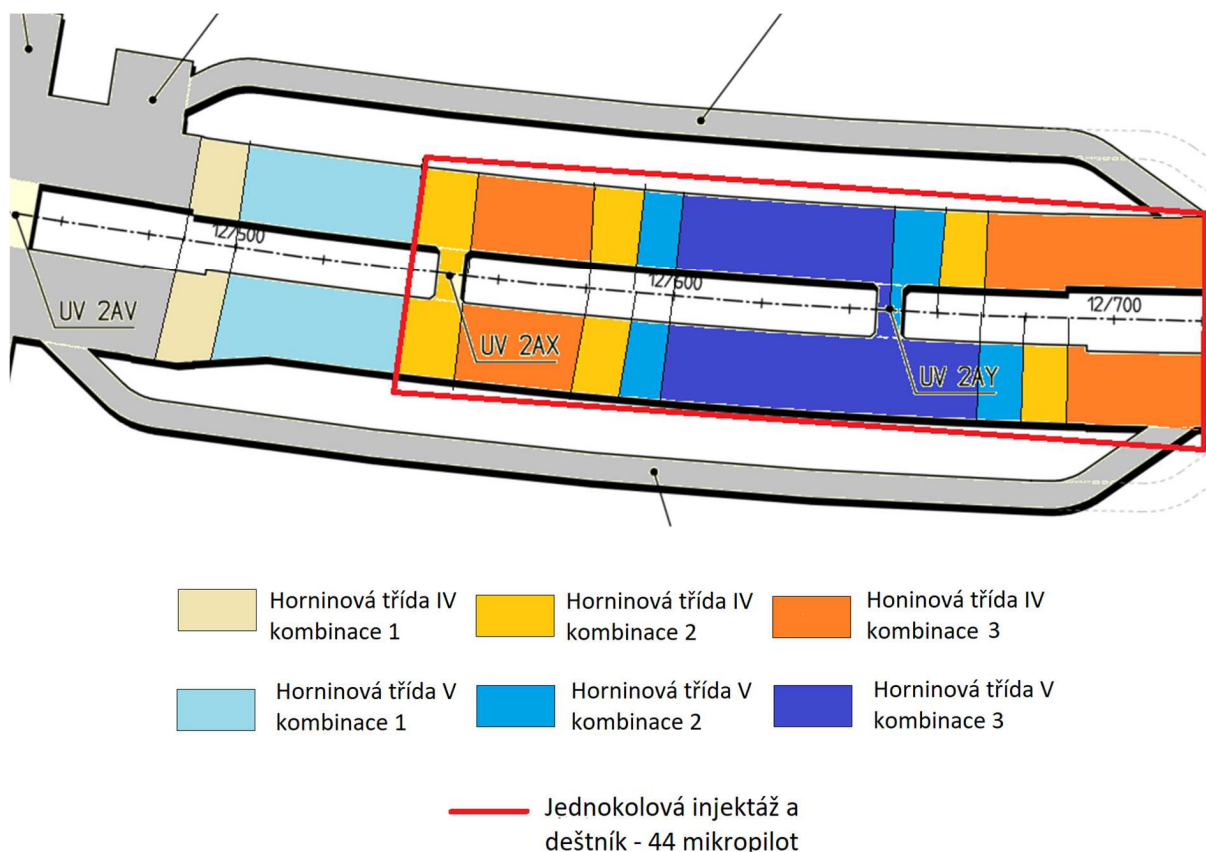
Tato optimalizace bude aplikována až od staničení 12/540 (obrázek 32), kde se ražba dostane za nejkritičtější oblast celého úseku.



Obrázek 31 - Označení oblasti pro aplikaci návrhu

5.4 Kompletní návrh

Na základě návrhů popsanych v kapitole 5.1.5, kapitole 5.2.5 a 5.3 byl vytvořeno schéma kompletního rozdělení v trase tunelového úseku dlouhého 240 metrů (obrázek 33).



Obrázek 32 - Schéma oblastí aplikace všech navržených optimalizací

Za základě tohoto schématu byl také vypracován optimalizovaný harmonogram ražby tohoto úseku, který je přiložen v přílohouvé části DP. Ražba 240 metrů dlouhého úseku obou tunelů bude po optimalizaci trvat 665,4 dní z původních 1208 dní. To odpovídá celkovému zrychlení ražby o 44,9% oproti původnímu plánu.

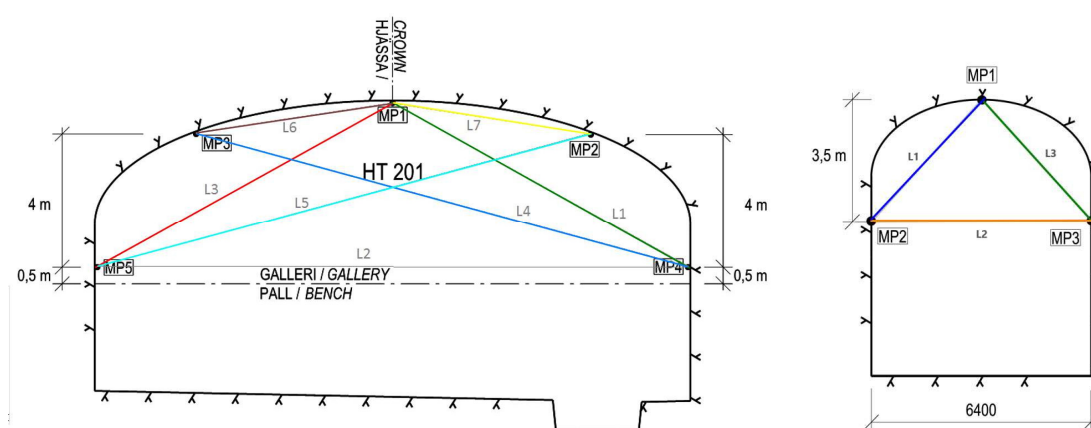
Celá ražba začíná injektáží předpole hlavního tunelu 1 ve staničení 12/490 po které následuje stavba mikropilotového deštníku. Po dokončení stavby mikropilotového deštníku je započata ražba i v hlavním tunelu 2. I přes pozdější začátek ražby bude ale hlavní tunel 2 vyražen v celé své délce s předstihem 28 dní. Tento rozdíl je zapříčiněn rozdílnou distribucí horninových tříd v trase tunelů.

6 Konvergenční měření

Od začátku ražby byly v ražených tunelech měřeny konvergence ostění a na základě výsledků těchto měření klient udával změny v razicím cyklu. Měření byla prováděna pomocí totální stanice a pěti konvergenčních hranolů v hlavních tunelech (obrázek 35) a tři konvergenčních hranolů v bypass tunelech (obrázek 35). Konvergenční profily jsou umístěny v bypass tunelech každých 60 metrů a v hlavních tunelech každých 28 metrů (obrázek 34).



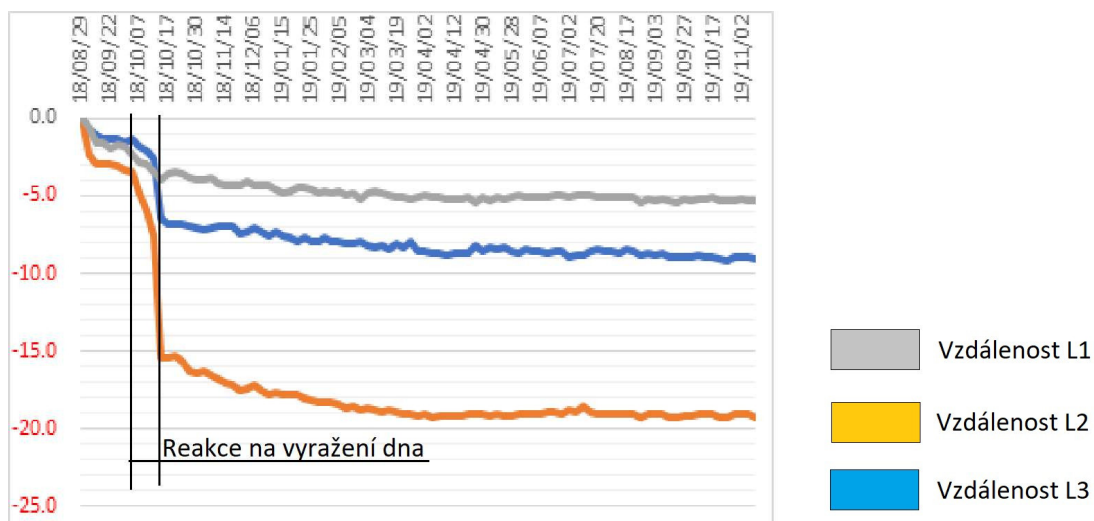
Obrázek 33 - Schéma se všemi umístěními konvergenčních profilů v trase díla. Označené profily 0/070 - červená, 0/130 - zelená.



Obrázek 34 - Schéma rozmístění měřičských hranolů v konvergenčním profilu v hlavním tunelu (vlevo) a bypass tunelu (vpravo)

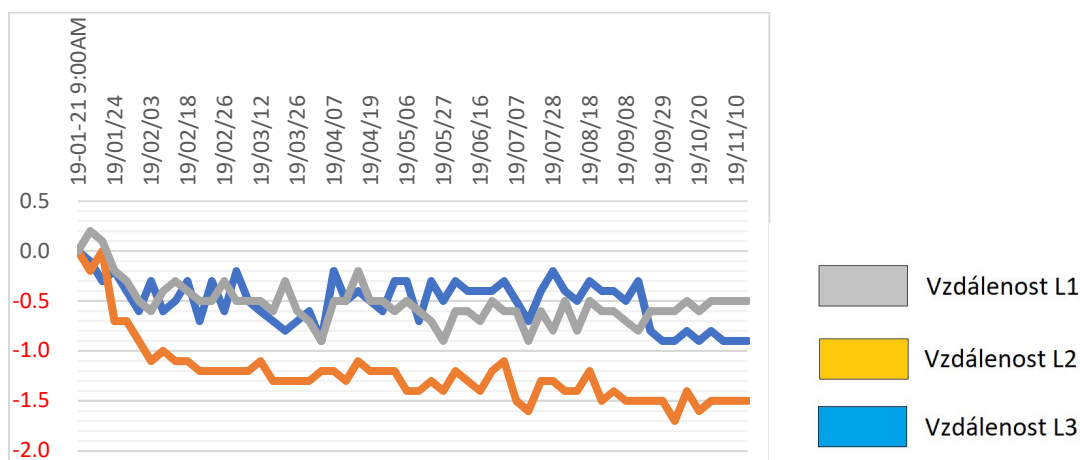
Na níže uvedeném grafu (graf 8) lze vidět hodnoty konvergencí v prvním konvergenčním profilu v bypass tunelu I ve staničení 0/070 (označeno červeně na orázku x).

Tento konvergenční profil se nachází přibližně v jedné třetině první významné poruchové zóny. Největší nárůst konvergencí byl zaznamenán po vyražení dna díla, kde byly překročeny hned dva varovné stavy (první - 2 mm ve stropu a 15 mm ve stěně, druhý - 4 mm ve stropu a 25 mm ve stěně). Poté ale došlo k ustálení konvergencí a ražba pokračovala dle původního plánu. [11]
[6]



Graf 8 - Průběh naměřených deformací v konvergenčním profilu 0/070

Měření v dalších konvergenčních profilech (graf 9) ukazovalo výrazné zlepšení kvality horniny a tak byla ražba v bypass tunelech optimalizována odstraněním jehel, odstraněním čelbových kotev, redukcí počtu kol injektáže, prodloužením záběru a ražbou na plný profil. Příklad měření Jelikož výsledky konvergenčních měření v tunelu bypass II jsou velice podobné měření v bypass I dá se předpokládat, že podobné podmínky budou zastiženy i v hlavních tunelech, což dosavadní měření v hlavních tunelech zatím potvrzují.



Graf 9 - Průběh naměřených deformací v konvergenčním profilu 0/130

7 Závěr

Diplomová práce se zabývala optimalizací ražby úseku Förbifart Stockholm, Mälrpassagen. Vysvětlovala technologie používané při ražbě a specifikovala použité materiály. Následně analyzovala razicí cyklus a identifikovala jeho problematické oblasti.

Na základě analýzy byly navrženy změny razicího cyklu pro jeho optimalizaci. Oblasti optimalizace a jejich následné posouzení byly zaměřeny především na redukci času potřebného pro vyztužení díla, injektáže a instalaci mikropilotového deštníku. V závislosti na horninové třídě byly navrženy varianty optimalizace, které byly následně použity pro tvorbu konečného návrhu.

Pro horninová třídu IV byly navrženy tyto varianty:

1. Čelba dělená na 2 části se záběrem 2,5 metrů
2. Ražba na plný profil se záběrem 3,33 metrů
3. Ražba na plný profil se záběrem 5 metrů

Pro horninovou třídu V byly navrženy tyto varianty:

1. Čelba dělená na tři části se záběrem 2 metry
2. Čelba dělená na dvě části se záběrem 2,5 metry
3. Čelba dělená na dvě části se záběrem 3,33 metry

Pro mikropilotový deštník bylo navrženo omezení jeho rozsahu pouze na strop a rohy díla, a tedy snížení počtu mikropilot na 44.

U těsnicí injektáže bylo navrženo snížení počtu injektážních vějířů na jeden za předpokladu, že po tomto kole bude zkouškami dokázána těsnost horninového masivu.

Výsledný návrh zkracuje ražbu obou tunelů délky 240 metrů o 44,9%. Původní ražba měla podle vytvořeného modelu trvat 1208 dní, ale díky aplikaci optimalizací by se tato hodnota snížila na 665 dní. Rozdíl mezi těmito hodnotami činí 537 dní.

Aplikací návrhu může být dramaticky snížen čas vyžadovaný pro ražbu díla. Snížením délky ražby dojde také ke snížení celkové ceny díla, především díky zkrácení doby pronájmu strojů. Cenu dále ovlivní vypuštění některých technologií a tím snížení množství použitého materiálu.

8 Seznam zdrojů

- [1] Wood, M., Marshall, A.[i] Tunneling: management by design.[/i] London: E & FN Spon, 2000. ISBN 0-419-23200-1.
- [2] Kolymbas, D.,[i] Tunnelling and Tunnel Mechanics: A Rational Approach to Tunnelling [/i]. Berlin: Springer, c2005, xv, 437 s. ISBN 35-402-5196-0.
- [3] Rozsypal, A. [i]Kontrolní sledování a rizika v geotechnice.[/i] Jaga: Bratislava, 2001. ISBN 80-88905-44-3.
- [4] NĚMEČEK, T.; PŘENOSIL, M.; Förbifart Stockholm – projekt FSE210. *TUNEL*. Praha: Česká a Slovenská tunelářská asociace ITA-AITES, 01/2017, 62-73. ISSN 1211 – 0728
- [5] NĚMEČEK T., Förbifart Stockholm – projekt FSE209, ražený tunel Skärholmen. *TUNEL*. Praha: Česká a Slovenská tunelářská asociace ITA-AITES, 2017, roč. 26, č. 4, 17-29. ISSN 1211 – 0728
- [6] NĚMEČEK T., Förbifart Stockholm - projekt FSE209 ražba pod jezerem Mälaren. *TUNEL*. Praha: Česká a Slovenská tunelářská asociace ITA-AITES, 02/2019, 30-38. ISSN 1211 – 0728
- [7] Projektová dokumentace E4 Förbifart Stockholm – FSE209 Huvudtunnlar Skärholmen, stavební projet, zpracoval ÅF Infrastruktur, Stockholm 2013
- [8] NĚMEČEK T., Ověření účinků těsnící injektáže - Förbifart Stocholm, Ostrava: Vysoká škola báňská - technická univerzita Ostrava, 2018.
- [9] TRAFIKVERKET [online]. 2018 [cit. 2018-11-25]. Om E4 Förbifart Stockholm-projektet. Dostupné z WWW: <https://www.trafikverket.se/naradig/Stockholm/projekt-i-stockholms-lan/Forbifart-stockholm/Om-projektet/>
- [10]] TRAFIKVERKET [online]. 2019 [cit.2019-10-21]. Hösten 2019: det här händer i E4 Förbifart Stockholm. Dostupné z WWW: <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/vi-bygger-och-forbattrar/Forbifart-stockholm/Aktuellt/2019/2019-09/hosten-2019-det-har-hander-i-e4-forbifart-stockholm/>

[11] TRAFIKVERKET [online]. 2018 [cit. 2018-08-07]. För en region i utveckling, Dostupné z WWW: <https://www.trafikverket.se/nara-dig/Stockholm/vi-bygger-och-forbattrar/Forbifart-stockholm/Om-projektet/For-en-region-i-utveckling/>

[12] Wikipedia [online] Sweden, Dostupné z WWW: <https://en.wikipedia.org/wiki/Sweden>

[13] Technické listy PreTec, PC coat, revize 02/2019

[14] Technické listy PreTec, PC-bolt, revize 02/2019

[15] Technické listy PreTec, Självborrande ankarstag, revize 02/2019

9 Seznam obrázků

Obrázek 1 - Aktuální možné trasy městem, A- E4 Essingeleden, B- silnice 73, C - Eköre	8
Obrázek 2 – Řez trasou Förbifart Stockholm	9
Obrázek 3 - Mapa projektu FSE209	10
Obrázek 4 – Řešený úsek Mälarpassagen dle prvního návrhu	11
Obrázek 5 - Fotografie čelby v průběhu ražby v hlavním tunelu 1	12
Obrázek 6 - Půdorysné schéma nového řešení	13
Obrázek 7 - Prostorové uspořádání nového řešení v řezu	13
Obrázek 8 - U umístění měřičských bodů v konvergenčním profilu	14
Obrázek 9 - Umístění konvergenčních profilů v trase bypass tunelů	14
Obrázek 10 - Schéma vyztužení výrubu bypass tunelů v horninových třídách I-IV	15
Obrázek 11 - Schéma vyztužení výrubu bypass tunelů v horninové třídě V	15
Obrázek 12 - Schéma dělení čelby hlavního tunelu pro horninovou třídu I-IV	16
Obrázek 13 - Schéma dělení čelby hlavního tunelu v horninové třídě V	17
Obrázek 14 - Nainstalovaná výpažnice bezpečnostního uzávěru	17
Obrázek 15 - Injektážní jednotka AMW	18
Obrázek 16 - Schéma injektážních vrtů prováděné těsnící injektáže	18
Obrázek 17 - Vrtačka Cassagrande	19
Obrázek 18 - Vrný profil výpažnice	20
Obrázek 19 - Schéma mikropilotového deštníku v průřezu stavby	20
Obrázek 20 - Příklad vrtného schéma pro trhačí práce	21
Obrázek 21 - Příklad zapojování rozbušek	21
Obrázek 22 - Nakladač CAT 988	22
Obrázek 23 - Stříkací souprava Meyco Potenza	23
Obrázek 24 - Kořeny kotev SN (vlevo) a PC (vpravo)	25
Obrázek 25 - Rozložení horninových tříd v trase tunelu, Žlutá - horninová třída IV, Červená - horninová třída V	27
Obrázek 26 - Schéma dělení čelby hlavního tunelu v horninové třídě IV	30
Obrázek 27 - Schéma dělení čelby v horninové třídě V	35
Obrázek 28 - Rozložení navržených kombinací pro horninovou třídu IV v trase díla	49
Obrázek 29 - Rozložení navržených kombinací pro horninovou třídu V v trase díla	58
Obrázek 30 – Označení oblasti pro aplikaci návrhu	59
Obrázek 31 - Označení oblasti pro aplikaci návrhu	60
Obrázek 32 - Schéma oblastí aplikace všech navržených optimalizací	61
Obrázek 33 - Schéma se všemi umístěními konvergenčních profilů v trase díla. Označené profily 0/070 - červená, 0/130 - zelená	62
Obrázek 34 - Schéma rozmístění měřičských hranolů v konvergenčním profilu v hlavním tunelu (vlevo) a bypass tunelu (vpravo)	62

10 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Stanovení rychlosti operací ražby	26
Tabulka 2 - Množství použitého materiálu a objem prací pro výstavbu celého úseku Mälarpassagen	27
Tabulka 3 - Schéma postupu ražby na referenčním úseku 10 metrů	30
Tabulka 4 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách v horninové třídě IV	31
Tabulka 5 - Délka jednotlivých operací ražby v horninové třídě IV	31
Tabulka 6 - Schéma časové posloupnosti ražby kaloty hlavního tunelu v horninové třídě V .	35
Tabulka 7 - Schéma časové posloupnosti ražby dna hlavního tunelu v horninové třídě V	35
Tabulka 8 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách v horninové třídě V	36
Tabulka 9 - Délka jednotlivých operací ražby v horninové třídě IV	36
Tabulka 10 - Množství materiálu a objemu práce vyžadované pro jednotlivé vedlejší operace	39
Tabulka 11 - Čas potřebný pro vykonání jednotlivých operací	39
Tabulka 12 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách	42
Tabulka 13 - Délka jednotlivých operací ražby	42
Tabulka 14 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách	43
Tabulka 15 - Délka jednotlivých operací ražby	44
Tabulka 16 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách	45
Tabulka 17 - Délka jednotlivých operací ražby	46
Tabulka 18 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách	47
Tabulka 19 - Délka jednotlivých operací ražby	48
Tabulka 20 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách	51
Tabulka 21 - Délka jednotlivých operací ražby	51
Tabulka 22 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách	52
Tabulka 23 - Délka jednotlivých operací ražby	53
Tabulka 24 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách	54
Tabulka 25 - Délka jednotlivých operací ražby	55
Tabulka 26 - Množství použitého materiálu a objem prací pro ražbu na jednotlivých čelbách	56
Tabulka 27 - Délka jednotlivých operací ražby	57

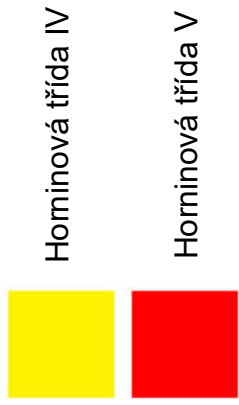
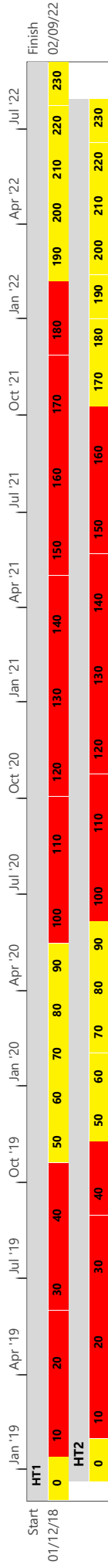
11 Seznam grafů

Graf 1 - Distribuce potřebného času pro ražbu referenčního úseku 10 metrů mezi jednotlivé čelby při ražbě v horninové třídě IV	32
Graf 2 - Rozdělení času mezi jednotlivé hlavní operace razícího cyklu	32
Graf 3 - Rozdělení času mezi jednotlivé operace vyztužování	33
Graf 4 - Distribuce potřebného času pro ražbu referenčního úseku 10 metrů mezi jednotlivé čelby při ražbě v horninové třídě V	37
Graf 5 - Rozdělení času mezi jednotlivé hlavní operace ražby	37
Graf 6 - Rozdělení času pro vyztužování mezi jednotlivé operace	38
Graf 7 - Rozdělení požadovaného času mezi jednotlivé vedlejší operace	40
Graf 8 - Průběh naměřených deformací v konvergenčním profilu 0/070	63
Graf 9 - Průběh naměřených deformací v konvergenčním profilu 0/130	63

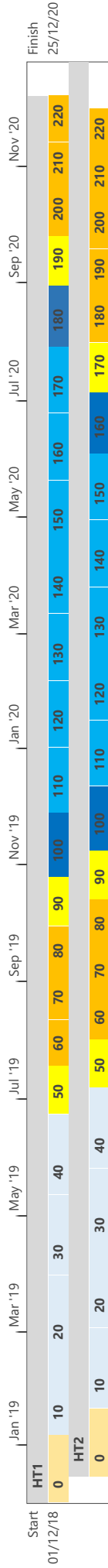
Přílohová část

Seznam příloh

- I Harmonogram ražby dle výchozí dokumentace
- II Hormonogram ražby dle výsledného návrhu
- III Cyklogram ražby v horninové třídě IV dle výchozí dokumentace
- IV Cyklogram ražby v horninové třídě V dle výchozí dokumentace
- V Cyklogram ražby v horninové třídě IV dle navržené kombinace č. 1
- VI Cyklogram ražby v horninové třídě IV dle navržené kombinace č. 2
- VII Cyklogram ražby v horninové třídě IV dle navržené kombinace č. 3
- VIII Cyklogram ražby v horninové třídě V dle navržené kombinace č. 1
- IX Cyklogram ražby v horninové třídě V dle navržené kombinace č. 2
- X Cyklogram ražby v horninové třídě V dle navržené kombinace č. 3



I - Harmonogram rážby dle výchozí dokumentace



- Hormonová třída IV - kombinace 1
- Hormonová třída IV - kombinace 2
- Hormonová třída IV - kombinace 3
- Hormonová třída V - kombinace 1
- Hormonová třída V - kombinace 2
- Hormonová třída V - kombinace 3

II - Hormonogram rážby dle výsledného návrhu

